

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA,
MATERIAIS E DE MINAS –
MESTRADO PROFISSIONAL

DANIEL PEREIRA PINTO

**INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DA ÁGUA NA FLOTAÇÃO REVERSA DE
MINÉRIO DE FERRO NA UNIDADE DE CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO
DA ANGLO AMERICAN**

BELO HORIZONTE

2024

DANIEL PEREIRA PINTO

**INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DA ÁGUA NA FLOTAÇÃO REVERSA DE
MINÉRIO DE FERRO NA UNIDADE DE CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO
DA ANGLO AMERICAN**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Área de concentração: Beneficiamento Mineral

Orientadora: Prof.^a Dra. Sônia Denise Ferreira Rocha

Coorientador: Dr. Luis Cláuzio de Rennó Machado

BELO HORIZONTE

2024

| | |
|-------|---|
| P659i | <p>Pinto, Daniel Pereira. Influência da qualidade da água na flotação reversa de minério de ferro na unidade de Conceição do Mato Dentro da Anglo American [recurso eletrônico] / Daniel Pereira Pinto. – 2024. 1 recurso online (108 f.: il., color.): pdf.</p> <p>Orientadora: Sônia Denise Ferreira Rocha. Coorientador: Luís Cláuzio de Rennó Machado;</p> <p>Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices: f. 106-108.</p> <p>Bibliografia: f. 100-105. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Água - Qualidade - Teses. 4. Minérios de ferro - Teses. 5. Flotação - Teses. I. Rocha, Sônia Denise Ferreira. II. Machado, Luís Cláuzio de Rennó. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> |
| | CDU: 622(043) |

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Ângela Cristina Silva CRB/6 2361
 Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO DANIEL PEREIRA PINTO

Realizou-se, no dia 03 de Junho de 2024, às 14:00 horas, via Microsoft Teams, na Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada "INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DA ÁGUA NA FLOTAÇÃO REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO NA UNIDADE DE CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO DA ANGLO AMERICAN", apresentada por DANIEL PEREIRA PINTO, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Profa. Dra. Sônia Denise Ferreira Rocha - Orientadora (UFMG), Dr. Luís Cláuzio de Rennó Machado - Coorientador (Anglo American), Dr. André Luís Alvarenga Santos (DEMIN-UFMG), Dr. Eliomar Evaristo Ferreira (Vale) e Prof. Dr. Luciano Fernandes de Magalhães (DEMIN-UFMG).

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 03 de Junho de 2024.

Documento assinado digitalmente
gov.br SONIA DENISE FERREIRA ROCHA
Data: 10/06/2024 08:38:30-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Profa. Dra. Sônia Denise Ferreira Rocha - Orientadora (UFMG)

Dr. Luís Cláuzio de Rennó Machado - Coorientador (Anglo American)

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRE LUIZ ALVARENGA SANTOS
Data: 11/06/2024 08:41:18-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Dr. André Luís Alvarenga Santos (DEMIN-UFMG)

Documento assinado digitalmente
gov.br ELIOMAR EVARISTO FERREIRA
Data: 24/06/2024 08:21:05-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Dr. Eliomar Evaristo Ferreira (Vale)

Documento assinado digitalmente
gov.br LUCIANO FERNANDES DE MAGALHAES
Data: 24/06/2024 12:36:29-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Prof. Dr. Luciano Fernandes de Magalhães (DEMIN-UFMG)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e habilidades que me permitem ser capaz de executar essas obras, bem como pela força, resiliência e proteção durante toda a minha caminhada.

A minha esposa pelo constante apoio, por me motivar diariamente a ser cada dia melhor e por compor e suportar um lar amoroso para a nossa família.

Aos meus Pais e Irmã que sempre me encorajaram a não desistir.

A Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A. pelo apoio e subsídio para aquisição dos dados para esse estudo.

A Denílson Rodrigues de Araújo pelo incentivo e apoio.

A Profa. Sônia Denise Ferreira Rocha pela orientação cuidadosa e pela atenção para que este trabalho fosse concluído da melhor forma possível.

A LuísCláuzio de Rennó Machado pela coorientação e constantes discussões técnicas sobre o estudo.

A equipe dos laboratórios de processos da Anglo American, em especial ao MárcioAparecido Cruz e Wanderson Couto pela execução dos testes de flotação.

A Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em especial ao Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN), pela oportunidade de desenvolvimento científico.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desse trabalho.

RESUMO

A concentração por flotação é atualmente um dos métodos mais utilizados para a concentração de minérios de ferro. Esse método de separação opera em meio aquoso, e exerce uma grande influência na eficiência de separação. A disponibilidade da água é cada vez mais problemática, tanto em quantidade, quanto em qualidade. A flotação do minério de ferro oriundo da Serra do Sapo, no município de Conceição do Mato Dentro-Minas Gerais-Brasil é executado com uma mistura de águas, majoritariamente, água recuperada dos espessadores, água recuperada da barragem de rejeitos e água captada do Rio do Peixe. O minério de característica friável é composto em sua maioria por hematita e quartzo. Este estudo tem como objetivo entender o comportamento da flotação com diferentes fontes de água e entender os principais fatores que influenciam a performance da flotação. Foram executados testes de flotação em bancada utilizando a polpa em pH 10,5, com dosagens de 1450 g/t Fe de amido (solução estoque de amido a 3%) e 150g/ton de amina (solução estoque de amina a 1%). Foram utilizadas na flotação 4 tipos de água separadamente, sendo, água deionizada, água do Rio do Peixe, água do *overflow* dos espessadores e água da barragem de rejeito. Nessas águas foram analisadas as concentrações dos elementos Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si e Ti, além da concentração de carbono orgânico total, concentração de oxigênio dissolvido, DBO, DQO, ORP, condutividade e turbidez. Segundo os resultados executados em escala de bancada as águas do Rio do Peixe promovem melhor desempenho do processo de separação em comparação com as águas recuperadas dos espessadores e da barragem de rejeitos. O modelo estatístico construído com os dados gerados aponta que a condutividade, a concentração de alumínio dissolvido na água e oxigênio dissolvido na água utilizada na flotação são os fatores mais importantes que afetam o índice de seletividade da flotação.

Palavras-chave: Flotação; Qualidade de água; Minério de ferro; Flotação de minério de ferro.

ABSTRACT

Flotation concentration is one of the most used operation for concentrating iron ores. This separation method operates in an aqueous medium which has a great influence on the separation efficiency. Water availability has been increasingly problematic, both in terms of quantity and quality. The flotation of iron ore from Serra do Sapo, in the municipality of Conceição do Mato Dentro- Minas Gerais-Brazil, is carried out with a mix of waters, the majority of which are water recovered from thickeners, water recovered from the tailings dam and water collected from the Rio do Peixe. The ore has a friable characteristic, mostly composed of hematite and quartz. This study aims to understand the flotation behavior carried out with different water sources and to understand the main factors that influence concentration performance. Bench flotation tests were carried out using the pulp at pH 10.5, with dosages of 1450 g/t Fe of starch (3% starch stock solution) and 150g/ton of amine (1% amine stock solution). Four types of water sources were used separately in flotation, namely, deionized water, water from the Rio do Peixe, water from the overflow of the thickeners and water from the tailings dam. For these waters, the concentrations of Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si and Ti were analyzed, in addition to the concentration of total organic carbon, dissolved oxygen, DBO, COD, ORP, conductivity and turbidity. According to the results, the waters from the Rio do Peixe promoted better performance of the separation process compared to the water recovered from the thickeners and the tailings dam. The statistical model built with the experimental data indicates that conductivity, aluminum concentration and oxygen dissolved in the water used in flotation are the 3 most important factors that influence the Flotation Selectivity Index.

Keywords: Flotation; Water quality; Iron ore; Iron ore flotation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 01 – Exportações e Importações do setor mineral em 2022 | 16 |
| Figura 02 – Fluxograma do sistema Minas-Rio da Anglo American..... | 21 |
| Figura 03 – Diagrama de blocos de etapas da atividade experimental | 33 |
| Figura 04 – Imagens do microscópio óptico da amostra de minério | 38 |
| Figura 05 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura das amostras de minério..... | 39 |
| Figura 06 – Variabilidade das concentrações de diversos elementos (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si e Ti) na água deionizada nas diversas coletas..... | 41 |
| Figura 7 – Variabilidade das concentrações de diversos elementos (Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si e Ti) nas diversas coletas da água do Rio do Peixe..... | 44 |
| Figura 08- Variabilidade das concentrações de diversos elementos (Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si e Ti), nas diversas coletas da água do overflow dos espessadores | 48 |
| Figura 09 - Variabilidade das concentrações de diversos elementos (Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si e Ti), nas diversas coletas da água da barragem | 51 |
| Figura 10 – Variação das concentrações de alumínio nas diferentes águas estudadas | 55 |
| Figura 11 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Ba nas diferentes águas estudadas..... | 56 |
| Figura 12 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Ca nas diferentes águas estudadas..... | 57 |
| Figura 13 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Fe nas diferentes águas estudadas..... | 58 |
| Figura 14 – Gráfico de séries temporais das concentrações de K nas diferentes águas estudadas..... | 59 |
| Figura 15 – Gráfico de séries das concentrações de Mg nas diferentes águas estudadas..... | 60 |
| Figura 16 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Mn nas diferentes águas estudadas..... | 61 |
| Figura 17 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Na nas diferentes águas estudadas..... | 62 |
| Figura 18 – Gráfico de séries temporais das concentrações de P nas diferentes | |

| | |
|--|----|
| águas estudadas..... | 63 |
| Figura 19 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Si nas diferentes águas estudadas..... | 63 |
| Figura 20 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Ti nas diferentes águas estudadas..... | 64 |
| Figura 21 – Gráfico de séries temporais do pH nas diferentes águas estudadas | 65 |
| Figura 22 – Gráficos de séries temporais do ORP nas diferentes águas estudadas | 66 |
| Figura 23 – Gráfico de séries temporais do Oxigênio dissolvido nas diferentes águas estudadas..... | 67 |
| Figura 24 – Gráfico de séries temporais da Condutividade nas diferentes águas estudadas..... | 68 |
| Figura 25 – Gráfico de séries temporais da turbidez nas diferentes águas estudadas | 69 |
| Figura 26 – Turbidez nas diferentes águas estudadas com escala reduzida no eixo das ordenadas..... | 70 |
| Figura 27 – Demanda biológica de oxigênio nas diferentes águas estudadas | 71 |
| Figura 28 – Gráfico de séries temporais da Demanda química de oxigênio nas diferentes águas estudadas..... | 72 |
| Figura 29 – Carbono orgânico total nas diferentes águas estudadas | 73 |
| Figura 30 – Pluviometria no município de Conceição do Mato Dentro em 2023 .. | 74 |
| Figura 31 – Análise ANOVA das concentrações de diversos elementos (Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si e Ti), e características das diversas águas estudadas..... | 75 |
| Figura 32 – Efeito d tempo na rejeição da sílica para diferentes águas | 82 |
| Figura 32a – Variação da rejeição de ferro com diferentes águas | 82 |
| Figura 33 – Variação do teor de Fe no rejeito para os testes de flotação realizados com as diversas águas coletadas em diferentes dias | 83 |
| Figura 34 – Variações dos teores de sílica no concentrado da flotação para as diferentes fontes de água..... | 85 |
| Figura 35 – Séries temporais de recuperação em massa para os testes de flotação | 86 |
| Figura 36 – Gráfico de séries temporais de recuperação de Fe para os testes de flotação | 87 |
| Figura 37 – Gráfico de séries temporais índice de seletividade para os testes de | |

| | |
|--|----|
| flotação..... | 88 |
| Figura 38 – Gráfico de séries temporais de redução de SiO ₂ para os testes de flotação..... | 89 |
| Figura 39 – Análises anova dos resultados dos testes de flotação para cada água | 91 |
| Figura 40 – Gráfico de Pareto dos parâmetros que mais influenciam o índice de seletividade da flotação..... | 97 |
| Figura 41 – Gráfico de Pareto dos parâmetros que mais influenciam a recuperação de Fe..... | 98 |
| Figura 42 – Gráfico de Pareto dos parâmetros que mais influenciam a recuperação em massa..... | 99 |
| Figura 43 – Gráfico de Pareto dos parâmetros que mais influenciam o teor de SiO ₂ no concentrado..... | 99 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 01 – Composição química das amostras utilizadas no presente estudo | 36 |
| Tabela 02 – Análise Estatística da variabilidade da composição química das amostras utilizadas dos testes de flotação..... | 37 |
| Tabela 03 – Fases minerais presentes nas amostras da alimentação da flotação por Difratomia de Raios X..... | 37 |
| Tabela 04 – Análise mineralógica via microscopia óptica do minério utilizado nos testes..... | 37 |
| Tabela 05 – Datas das coletas de águas e testes de flotação..... | 40 |
| Tabela 06 – Parâmetros orgânicos da água do Rio do Peixe..... | 47 |
| Tabela 07 – Parâmetros orgânicos da água do overflow dos espessadores | 47 |
| Tabela 08 – Estatísticas do Al nas diferentes águas estudadas..... | 55 |
| Tabela 09 – Estatísticas do Ba nas diferentes águas estudadas..... | 56 |
| Tabela 10 – Estatísticas do Ca nas diferentes águas estudadas..... | 58 |
| Tabela 11 – Estatísticas do Fe nas diferentes águas estudadas..... | 59 |
| Tabela 12 – Estatísticas do K nas diferentes águas estudadas..... | 60 |
| Tabela 13 – Estatísticas do Mg nas diferentes águas estudadas..... | 61 |
| Tabela 14 – Estatísticas do Mn nas diferentes águas estudadas..... | 62 |
| Tabela 15 – Estatísticas do Na nas diferentes águas estudadas..... | 62 |
| Tabela 16 – Estatísticas do P nas diferentes águas estudadas..... | 64 |
| Tabela 17 – Estatísticas do Si nas diferentes águas estudadas..... | 64 |
| Tabela 18 – Estatísticas do Ti nas diferentes águas estudadas..... | 65 |
| Tabela 19 – Estatísticas do pH nas diferentes águas estudadas..... | 66 |
| Tabela 20 – Estatísticas do ORP nas diferentes águas estudadas..... | 67 |
| Tabela 21 – Estatísticas dos valores de oxigênio dissolvido nas diferentes águas estudadas..... | 68 |
| Tabela 22 – Estatísticas da condutividade nas diferentes águas estudadas..... | 69 |

| | |
|--|------------|
| Tabela 23 – Estatísticas da turbidez nas diferentes águas estudadas..... | 71 |
| Tabela 24 – Estatísticas da demanda biológica de oxigênio nas diferentes águas estudadas..... | 72 |
| Tabela 25 – Estatísticas da demanda química de oxigênio nas diferentes águas estudadas..... | 72 |
| Tabela 26 – Estatísticas do carbono orgânico total nas diferentes águas estudadas | 73 |
| Tabela 27 - Tabela resumo das características das águas estudadas..... | 81 |
| Tabela 28 –Estatísticas básicas para o Fe no rejeito para os testes de flotação..... | 84 |
| Tabela 29 – Estatísticas básicas do SiO₂ no concentrado para os testes de flotação | 85 |
| Tabela 30 – Estatísticas básicas da recuperação em massa para os testes de flotação | 86 |
| Tabela 31 – Estatísticas básicas para o Fe no rejeito para os testes de flotação | 87 |
| Tabela 32 – Estatísticas básicas índice de seletividade para os testes de flotação | 88 |
| Tabela 33 – Estatísticas básicas da redução de SiO₂ para os testes de flotação | 89 |
| Tabela 34 – Testes de flotação com água in natura e depois de tratadas por clarificação..... | 93 |
| Tabela 35 – Resultados dos testes com águas in natura e posteriormente filtradas | 95 |
| Tabela 36 - Resultado estatístico do modelo matemático multivariado..... | 96 |
| Tabela 37 – Variáveis importantes dos modelos matemáticos multivariados..... | 100 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| UFMG | Universidade Federal de Minas Gerais |
| CFEM | Compensação Financeira pela Exploração Mineral |
| IBRAM | Instituto Brasileiro de Mineração |
| CSN | Companhia Siderúrgica Nacional |
| IGAM | Instituto Mineiro de Gestão das Águas |
| pH | Potencial Hidrogeniônico |
| COT | Carbono Orgânico Total |
| ORP | <i>Oxidation-Reduction Potential</i> (Potencial de Oxidação/Redução) |
| DBO | Demanda Bioquímica de Oxigênio |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio |
| ICP | Espectrometria de emissão atômica |
| DRX | Difratometria de Raios X |
| FRX | Fluorescência de Raios X |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |

SUMÁRIO

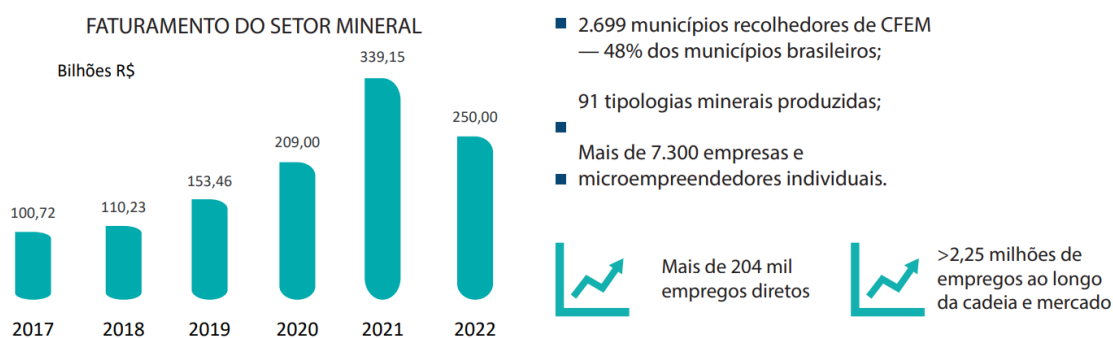
| | | |
|----------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1. | Relevância do tema..... | 18 |
| 1.2. | Objetivos..... | 19 |
| 1.2.1. | Objetivo Global | 19 |
| 1.2.2. | Objetivos Específicos | 19 |
| 2. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 20 |
| 2.1. | Minério de Ferro..... | 20 |
| 2.1.1. | Cominuição..... | 22 |
| 2.1.2. | Classificação..... | 22 |
| 2.1.3. | Flotação | 23 |
| 2.2. | Água na flotação..... | 23 |
| 3. | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 28 |
| 3.1. | Amostras..... | 28 |
| 3.1.1. | Amostragem e composição da amostra padrão | 28 |
| 3.1.2. | Amostras de água | 28 |
| 3.1.3. | Amostras de reagentes | 28 |
| 3.2. | Caracterizações..... | 29 |
| 3.2.1. | Características das águas | 29 |
| 3.2.1.1. | ORP (potencial de oxidação/redução)..... | 29 |
| 3.2.1.2. | DBO (demanda bioquímica de oxigênio)..... | 29 |
| 3.2.1.3. | DQO (demanda química de oxigênio)..... | 29 |
| 3.2.1.4. | COT (carbono orgânico total) | 29 |
| 3.2.1.5. | Oxigênio dissolvido..... | 30 |
| 3.2.1.6. | pH (potencial hidrogeniônico)..... | 30 |
| 3.2.1.7. | Condutividade elétrica..... | 30 |
| 3.2.1.8. | Turbidez..... | 30 |
| 3.2.1.9. | Outros elementos | 31 |
| 3.2.2. | Características dos sólidos..... | 31 |
| 3.2.2.1. | Identificação de fases minerais por difratometria de raios X (DRX)..... | 31 |
| 3.2.2.2. | Análise química por fluorescência de raios X (FRX)..... | 31 |
| 3.2.2.3. | Morfologia por Mineralogia por microscopia óptica | 31 |
| 3.2.2.4. | Mineralogia por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) | 32 |
| 3.3. | Testes de flotação | 32 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 3.3.1. | Cinética de flotação | 33 |
| 3.3.2. | Ensaio de flotação com água tratada..... | 33 |
| 3.4. | Metodologia global..... | 33 |
| 4. | RESULTADOS OBTIDOS..... | 35 |
| 4.1. | Caracterização física, química e mineralógica das amostras do minério | 35 |
| 4.2. | Águas utilizadas nos testes | 39 |
| 4.3. | FLOTAÇÃO..... | 81 |
| 4.3.1 | Cinética de flotação | 81 |
| 4.3.2 | – Ensaio de Flotação | 83 |
| 4.3.3 | - Flotação com águas tratadas por filtração e clarificação..... | 93 |
| 4.3.4 | Modelo estatístico do desempenho da flotação | 95 |
| 5. | CONCLUSÕES | 101 |
| 6. | SUGESTÃO PARA ESTUDOS FUTUROS | 102 |
| | REFERÊNCIAS | 103 |
| | APÊNDICE - Metodologia dos testes de flotação | 109 |

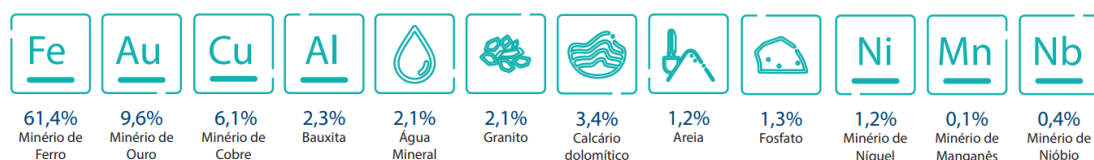
1. INTRODUÇÃO

Em 2022, o setor mineral brasileiro registrou um faturamento de R\$ 250 bilhões (excluindo-se petróleo e gás) e a arrecadação da CFEM totalizou R\$ 7,08 bilhões, tendo as exportações minerais brasileiras alcançado US\$ 41,7 bilhões. O saldo comercial mineral, de quase US\$ 24,9 bilhões, equivale a 40% do saldo comercial brasileiro, que foi de US\$ 61,8 bilhões (Relatório anual do IBRAM 2022). Na Figura 01 observa-se a liderança do minério de ferro no setor mineral, seguido pelo ouro, cobre e alumínio.

Figura 01- Exportações e Importações do setor mineral em 2022



Principais substâncias produzidas - Participação no faturamento do setor



Fonte: Economia Mineral Brasileira (IBRAM, 2023)

Segundo o IBRAM, o minério de ferro é o bem mineral mais exportado pelo Brasil, sendo as 3 principais empresas desse setor, em valor de produção são a Vale, a própria Anglo American e a CSN mineração.

Nesse cenário o grupo Anglo American dispõe de três unidades no Brasil, sendo duas unidades que produzem níquel, uma em Barro alto e outra em Niquelândia, ambas em Goiás, e uma unidade de produção de minério de ferro na cidade de Conceição do Mato Dentro, com produção da ordem de 24 milhões de toneladas de minério de ferro.

A unidade de mineração e beneficiamento de minério de ferro da Anglo American em Conceição do Mato Dentro extrai e beneficia minérios itabiríticos. A rota de beneficiamento inclui etapas de britagem, rebitagem em circuito fechado com peneiramento, moagem em moinho de rolos, moagem em circuito fechado com hidrociclones classificadores, deslamagem em hidrociclones, flotação, remoagem, espessamento e bombeamento da polpa.

Concentração por flotação eleva-se os teores médios de 40% de Fe na alimentação da usina a valores médios de 68% de Fe no concentrado. A flotação depende diretamente dos fenômenos interfaciais envolvidos na adsorção dos reagentes depressor e coletor, que conferem a hidrofiliabilidade ou hidrofobicidade respectivamente às superfícies minerais, requisitos básicos para a separação.

A adsorção desses reagentes nas superfícies minerais é muito influenciada pelas características da água, como pH, que no caso da flotação de ferro ocorre em valores próximos a 10, pela carga de superfície dos minerais, usualmente inferida por medidas de potencial zeta, pela concentração dos reagentes residuais utilizados como aminas (coletor) e amidos (depressor) da água de reuso, pela quantidade de sólidos em suspensão e também pela presença de outros constituintes dissolvidos na água (Santos *et al.*, 2024).

A qualidade da água utilizada no processo mineral é essencial para que o desempenho das operações de separação seja otimizado. Esta influência da qualidade da água na flotação do minério da mina de Sossego foi estudada e observado que a presença dos excessos de cloretos, cálcio e magnésio na água causaram uma diminuição da recuperação metalúrgica do cobre, mas aumentaram a seletividade do processo (Mendonça *et al.*, 2011). Adicionalmente, a presença de ultrafinos e sólidos em suspensão, de elevada área superficial, tendem também a consumir os reagentes que deveriam atuar explicitamente na separação das espécies minerais. Porém, para outras características, como a concentração de elementos dissolvidos na água, não se tem bem conhecida a influência destas no processo de flotação de minérios de ferro, uma vez que também a mineralogia do minério é um fator a ser considerado.

Várias jazidas de minério de ferro possuem teores de Fe altos o suficiente para atender a especificação do mercado. Porém em outros casos, como na Anglo American, a concentração do minério de ferro é essencial para atender as especificações de mercado, sendo a flotação a principal operação que viabiliza os níveis de separação requeridos.

1.1. Relevância do tema

A eficiência do processo de beneficiamento do minério de ferro está intimamente ligada com a qualidade da água utilizada. Uma água originada de uma bacia de sedimentos, por exemplo, quando reciclada para a planta de beneficiamento mineral, apresenta alta turbidez visto que carrega consigo partículas sólidas finas em suspensão. Essas partículas, podem interferir no processo de recobrimento das partículas de minerais de ganga e de minerais de interesse, bem como interferir no caráter hidrofílico e hidrofóbico que essas partículas recobertas devem adquirir. A água recuperada dos processos de separação sólido-líquido, como espessamento, filtração ou ciclonagem, possui a peculiaridade de conter reagentes, sejam eles orgânicos ou inorgânicos, uma vez que parte não se adsorve à superfície das partículas minerais e permanecem nessa água que é recirculada na planta de beneficiamento mineral. Esses reagentes residuais podem consumir oxigênio dissolvido na água, devido à degradação ou envelhecimento e essas reações podem formar outros compostos que podem alterar o comportamento da flotação.

Uma vez que cada água, dependendo da sua origem e características, pode afetar o comportamento da flotação, associada às diferentes mineralogias de minérios de ferro, é de suma importância conhecer essa influência no processo e buscar soluções para atingir a melhor performance possível no processo de concentração mineral.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Global

Pretende-se compreender como as características de águas de fontes diversas afetam o processo de concentração do minério do Projeto Minas Rio da Anglo American, visando evitar perdas de eficiência no processo.

1.2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos incluem:

- Caracterizar as águas utilizadas no processo de flotação na usina de beneficiamento mineral;
- Avaliar o desempenho da flotação com águas de diferentes fontes em escala de bancada;
- Executar o tratamento simplificado das águas de processos e a avaliação dessas águas tratadas no processo de flotação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Minério de Ferro

Na região do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, existem importantes reservas de minérios de ferro, sendo que estes podem ser classificados em dois principais grupos: “os itabiríticos, mais heterogêneos e contendo óxidos e hidróxidos de ferro, e os hematíticos, de alto teor, quimicamente mais homogêneos e ricos em óxidos de ferro[...]” (Rosière, 1983, p. 173). O projeto Minas Rio, pertencente a Anglo American, explora minérios de ferro itabiríticos, com teores de ferro da ordem de 40%. O empreendimento na área da Serra do Sapo, no município de Conceição do Mato Dentro, em Minas Gerais, conta com reservas prováveis de 1,45 bilhão de toneladas de minério de ferro. Como fonte principal de água a empresa utiliza o Rio do Peixe, com uma captação no município de Dom Joaquim. A empresa obteve outorga junto ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) para captar 2.500 m³/hora. Uma vez captada a água é utilizada no processamento mineral, sendo reutilizada por meio de captação na barragem de rejeitos e na recuperação do processo por meio de espessadores.

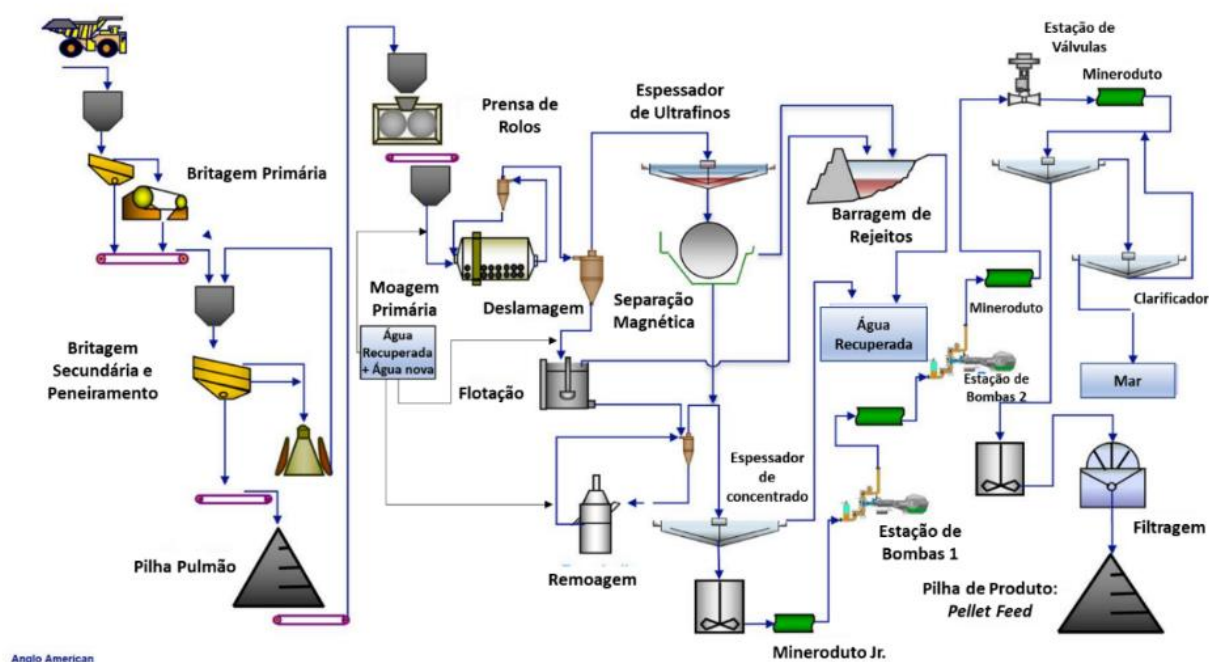
O processamento de concentração de minérios consiste em separar os minerais de interesses dos minerais de ganga de um minério, processo de concentração. Essa separação ocorre através da exploração de propriedades diferenciadoras, físicas ou físico-químicas, específicas dos minerais tais como cor, peso específico, forma, tamanho, susceptibilidade magnética e também características de superfície (Vieira, 1995). Segundo Luz e Lins (2004), em um fluxograma típico de tratamento de minérios, as operações unitárias são classificadas em:

- Operações de cominuição (redução de tamanho) para se obter a liberação do mineral: britagem, moagem e prensagem;
- Operações de separação por tamanhos: peneiramento e classificação

- granulométrica (ciclonação, classificador espiral), além da deslamagem;
- Operações de concentração: concentrações gravítica, magnética, eletrostática, flotação etc.;
- Operações auxiliares de desaguamento (eliminação de parte da água do concentrado): espessamento e filtração;
- Operações de disposição de rejeitos (filtração e ou disposição em barragem).

A Figura 02 apresenta o fluxograma de processos da unidade de Conceição do Mato Dentro. O processo de concentração do minério inicia com etapas de britagem primária, em britadores de mandíbulas, seguida de britagem secundária, em britadores cônicos, e prensagem em prensa de rolos, que visam criar micro trincas para reduzir o gasto de energia na etapa seguinte de moagem em moinho de bolas. Após a cominuição é feita a deslamagem do minério retirando a maior parte dos ultrafinos, que são desaguados no espessador de lamas e, posteriormente, são encaminhados para a barragem de rejeitos. Após a deslamagem, a polpa é enviada para a flotação, onde é condicionada com os reagentes necessários à flotação, tem ajuste da concentração de sólidos e alimenta as células de flotação em concentração de sólidos ajustada.

Figura 02 – Fluxograma do sistema Minas-Rio da Anglo American



Fonte: (modificado de Turreret *et al.*, 2018).

2.1.1. Cominuição

A cominuição é a etapa do processo em que se objetiva diminuir o tamanho da partícula do minério. Normalmente, essa é a primeira etapa do beneficiamento mineral logo após a retirada do material da mina. De toda a energia utilizada em um empreendimento de mineração, onde existe o beneficiamento mineral, a maior parte da energia gasta é despendida na cominuição, daí um dos motivadores da otimização dessa etapa (Luz, 2010).

Os equipamentos utilizados na fragmentação são britadores, rebritadores (como os britadores de mandíbulas, britadores giratórios, britadores cônicos e prensa de rolos) e os moinhos (como moinhos tubulares de bolas, moinhos tubulares de barras, moinhos de impactos, dentre outros).Esses equipamentos, comumente são utilizados em circuitos com mais de um equipamento, onde cada um faz uma redução na granulometria do minério até que a granulometria desejada, balizada pelo grau de liberação, seja obtida. Grande parte das vezes,esses circuitos de cominuição contam com etapas de classificação visando otimizar a etapa mais dispendiosa do processo.

2.1.2. Classificação

A classificação é a etapa onde é feita a separação de partículas por tamanho. Essa separação pode utilizar várias propriedades diferenciadoras do material em questão. Essas propriedades podem ser desde o tamanho da partícula propriamente dita, até a resistência do movimento dessas partículas em determinado fluido. Dentre os equipamentos de classificação mecânica estão as peneiras estáticas, peneiras vibratórias e grelhas fixas e vibratórias.A classificação em ciclones e hidrociclones, em que a força centrífuga incrementa a classificação é amplamente utilizada no beneficiamento de minérios, pois são instalações menos complexas e de capacidade maior em relação a área utilizada.A classificação é uma etapa crítica no processo mineral, pois adequa o tamanho para as etapas subsequentes e pode comprometer a eficiência do processo

como um todo. Classificadores espirais e em alguns casos as espirais concentradoras, também podem ser utilizados na classificação por tamanho e concentração, respectivamente.

2.1.3. Flotação

A flotação é uma operação de separação físico-química de minerais, que utiliza as diferenças de propriedades das superfícies dos minerais úteis e minerais de ganga. Engloba fenômenos que ocorrem nas interfaces sólido/líquido; líquido/gás e sólido/gás (Rabockai, 1979).

A seletividade da flotação depende da hidrofobicidade e da hidrofiliabilidade das espécies minerais. O conceito de hidrofílico está associado à afinidade da superfície mineral com a água, sendo hidrofóbicos aqueles minerais de baixa ou afinidade nula com a água, que é substância polar (Baltar, 2010). Entretanto, a presença de substâncias dissolvidas na água pode alterar os graus de hidrofiliabilidade e de hidrofobicidade dos minerais, bem como a cinética de adsorção de reagentes, que são necessários para se realizar uma flotação eficiente. Portanto, a avaliação e conhecimento dos efeitos da qualidade da água na flotação são relevantes para os processos minerais, tanto em termos de desempenho da operação, refletida na recuperação e teor do concentrado, quanto em termos ambientais, visando-se um reuso da água no processo.

2.2. Água na flotação

A indústria mineral, frente à restrição de captação de água nova, tem tentado diminuir o descarte de água de processo e aumentar a combinação de água de reuso com a água nova (Peters e Meybeck, 2000; Ridoutte Pfister, 2010). A água utilizada no processo de flotação em usinas de beneficiamento varia muito ao longo do tempo (Levaye Schumann, 2006; Luukkanen *et al.*, 2003; Sténet *al.*, 2003), tanto em termos de quantidade quanto de qualidade.

A composição da água utilizada no processo de flotação depende de vários fatores,

como as características dos minérios que são processados, reagentes utilizados, fontes de água e gestão do sistema de águas (Liu *et al.*, 2013). Os fatores que afetam a qualidade da água podem ser divididos em duas categorias: interna e externa à planta de concentração. Os fatores internos incluem os tipos de minérios tratados, reagentes utilizados e água de reuso interno, sendo essa proveniente de água recuperada de diferentes fontes como, espessadores, estoques internos, dentre outros. Fatores externos à planta de concentração se referem a água bruta captada e águas externas de reuso, como a água coletada de barragens de rejeitos (Liu *et al.*, 2013).

A composição química e a ocorrência de reações de oxidação e dissolução dos minerais presentes nos minérios durante o processo podem introduzir substâncias na água e com isso influenciar a eficiência da flotação. A natureza dessas reações depende dos minerais presentes, da temperatura e de condições como o potencial redox do meio (Eh) e do pH (Liu *et al.*, 2013).

A carga moedora dos moinhos também pode afetar a qualidade da água de flotação, uma vez que o material dessa carga não é inerte (Huang e Grano, 2006; Peng e Grano, 2010). Por exemplo, o Eh que está relacionado com o oxigênio dissolvido da polpa diminui imediatamente após a moagem quando é utilizada carga moedora de aço (Grano *et al.*, 1990), e devido ao pH da água o hidróxido de ferro é formado através da oxidação da carga moedora de aço eletroquimicamente reativo (Adam *et al.*, 1984; Grano, 2009). Como resultado, a flotação pode ser afetada devido ao efeito do Eh na adsorção dos reagentes e da presença de hidróxidos de ferro (Freeman *et al.*, 2000; Grano, 2009). A adição de reagentes para viabilizar o processo de flotação introduz várias substâncias orgânicas e inorgânicas na água de flotação, que alteram as características dos efluentes e águas reutilizadas (Schumann *et al.*, 2009). No caso estudado estão presentes compostos residuais orgânicos de aminas, amidos, poliacrilamidas e polyDADMAC, bem como íons hidroxila e íons de cálcio.

As águas da flotação reversa de minério de ferro contêm concentrações residuais de aminas, da ordem de 3,9 mg/L, utilizadas para a remoção do quartzo (Batisteli e Peres, 2008; Stapelfeldt e Lima, 2001). Os reagentes utilizados na flotação podem alterar as características da água (Slatter *et al.*, 2009), através da sua acumulação na água em um

estado original ou como produtos de degradação durante a reutilização da água e, eventualmente, atingir concentração inadequada ou suficiente para afetar o desempenho da flotação (W. Liu *et al.*, 2013). No entanto, a estratégia do reuso da água, definindo pontos de retorno da água, pode evitar efeitos indesejáveis (Rao e Finch, 1989).

O uso de múltiplas fontes de abastecimento de água bruta de qualidades diferentes é muito comum em muitas minerações. Por exemplo, fontes primárias de água contendo altos níveis de sais tais como sais de cálcio, magnésio e ferro, estão sendo usadas em várias áreas remotas com baixa disponibilidade deste recurso (Levay *et al.*, 2001). Ácidos húmicos, abundantes em águas naturais associados à decomposição de vegetação, são também encontrados na água de flotação, o que poderia segundo Lai *et al.*, (1984) piorar ocasionalmente a flotação de molibdenita. Fontes de água com altas concentrações de carbono orgânico (COT- *carbono orgânico total*) e microbiotas, podem afetar a performance da flotação (Levay *et al.*, 2001).

A estratégia comum de reuso da água é recuperar as águas das barragens de rejeitos e de outros reservatórios de água da planta de concentração e utilizá-las novamente. Ainda, há a variabilidade ocasionada pela evaporação da água, que pode elevar a concentração de elementos dissolvidos e constituintes coloidais em diferentes épocas do ano (Levay *et al.*, 2001).

Outro aspecto a ser considerado e refere aos processos físico-químicos e biológicos relacionados principalmente à degradação de reagentes de flotação que podem ocorrer nas barragens de rejeitos (Chen *et al.*, 2011; Nedved e Jansz, 2006). Nesses casos, íons metálicos hidrolisam-se em soluções de pH alcalino e podem precipitar como hidróxidos, sulfatos ou carbonatos metálicos, hidrofílicos, se suas concentrações estiverem acima de seus respectivos limites de solubilidade (Fuerstenau *et al.*, 1985). A formação de hidróxidos metálicos é influenciada, dentre outros fatores, pelo pH da água (Font *et al.*, 1999). A precipitação desses hidróxidos metálicos hidrofílicos em superfícies minerais tem sido geralmente descrita como indiscriminada (Kitchener, 1984), resultando na formação de uma barreira hidrofílica para a adsorção de reagentes coletores em superfícies minerais (Fornasiero e Ralston, 2006; Senior e Trahar, 1991).

A redução na hidrofobicidade da superfície mineral devido à precipitação de hidróxidos metálicos hidrofílicos pode comprometer a eficiência do subprocesso de adesão partícula-bolha (Koh *et al.*, 2009; Schwarz e Grano, 2005). Por outro lado, a presença de íons dissolvidos na água pode alterar a estabilidade da adesão das partículas às bolhas da espuma (Bıçak *et al.*, 2012; Farrokhpay e Zanin, 2012). Também, íons metálicos dissolvidos na água de flotação podem alterar a carga superficial das partículas e, conseqüentemente, afetar as interações entre partículas e reagentes coletores. Isso pode afetar a fixação partícula-bolha e a formação de agregados partícula-bolha estáveis (Ali *et al.*, 2000; Ata, 2012; Johansson e Pugh, 1992; Moolman *et al.*, 1996).

De modo indesejável, alguns íons metálicos também podem ativar minerais de ganga, afetando assim a seletividade da flotação em vários graus (W. Liu *et al.*, 2013), por exemplo, íons metálicos como chumbo, prata e ferro estão presentes na água de flotação e podem ativar superfícies de esfalerita (Chandra e Gerson, 2009; Finkelstein, 1997). A formação de uma camada de limo em superfícies minerais pode levar à depressão da flotação de minerais valiosos (W. Liu *et al.*, 2013).

Como efeito positivo de uma maior concentração de íons dissolvidos na água tem-se a compressão da dupla camada elétrica. A presença de eletrólitos pode melhorar a eficiência da ligação partícula-bolha através da compressão da dupla camada elétrica e, assim, reduzir a repulsão eletrostática entre partículas e bolhas (Kurniawan *et al.*, 2011). Também pode haver o efeito positivo dessa maior concentração de íons favorecer a formação de bolhas menores, uma vez que esses eletrólitos favorecem formação de menores bolhas e causa um aumento da estabilidade dessas devido à influência dos eletrólitos na tensão superficial e na solubilidade do gás (Pugh *et al.*, 1997). Bolhas menores aumentam a probabilidade de colisão entre partículas e bolhas (Bournival *et al.*, 2012; Pugh *et al.*, 1997), e ainda melhoram a eficiência de aderência das partículas às bolhas (Hewitt *et al.*, 1994).

Em alguns casos, os constituintes orgânicos da água podem trazer efeitos positivos na eficiência da flotação. Dois destes presentes na água que apresentam efeitos positivos são alguns reagentes residuais, como aminas e amidos, e algumas bactérias. Em alguns

casos reagentes residuais, como coletores, depressores e modificadores de pH, trazidos para os circuitos de flotação através do reuso da água permite a redução do consumo de reagentes (Liu *et al.*, 2013). No caso da flotação da Anglo American a amina residual recirculada pode promover uma economia no consumo deste insumo. A literatura reporta que a dosagem do coletor, no caso a amina, na flotação reversa de minérios de ferro pode ser reduzida em até 50% através do reuso externo da água (Batisteli e Peres, 2008; Stapelfeldt e Lima, 2001).

Exemplo do benefício de etapas de tratamento de água na flotação está no trabalho de Rao *et al.* (1988) que verificaram que a remoção de íons cálcio pelo ácido oxálico melhorou a recuperação do pirocloro e também que a adição de agentes complexantes, como complexos de aminas, ajudou a reverter os efeitos de ativação inadvertida de íons metálicos na flotação seletiva de pentlandita-piroxênio (Shackleton *et al.*, 2003).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Amostras

3.1.1. Amostragem e composição da amostra padrão

Foi preparada uma amostra de uma tonelada de minério. Esta, utilizada no estudo, foi composta de várias alíquotas coletadas na alimentação da flotação. A amostra da alimentação da flotação foi composta por alíquotas retiradas a cada 15 minutos e agrupadas de hora em hora. As amostras diárias foram unidas formando a amostra padrão que foi utilizada nesse estudo.

3.1.2. Amostras de água

As amostras de águas utilizadas foram as seguintes:

- Água da barragem de rejeitos;
- *Overflow* dos espessadores de concentrado e de lamas;
- Água coletada do Rio do Peixe;
- Água deionizada (Água potável tratada internamente na Anglo American e posteriormente deionizada por resinas trocadoras de íons modelo JP-50).

Essas águas foram coletadas semanalmente e utilizadas nos testes.

3.1.3. Amostras de reagentes

Os reagentes utilizados nos estudos, amina, amido, NaOH, coagulantes e floculantes,

foram os mesmos utilizados na planta de preparação de reagentes da empresa e as soluções foram preparadas no laboratório de processos. Essa preparação sempre foi feita com água deionizada.

3.2. Caracterizações

3.2.1. Características das águas

3.2.1.1. ORP (potencial de oxidação/redução)

A medição de potencial de oxidação/redução foi realizada com equipamento multipâmetros Pro-Quatro do fabricante YSI. A água recém coletada é colocada em um béquer onde a sonda de sensores do equipamento é colocada em contato com a água. O método de medição seguido é descrito no livro *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, no método de número 2580.

3.2.1.2. DBO (demanda bioquímica de oxigênio)

A análise de demanda bioquímica de oxigênio, que indica a quantidade de matéria orgânica que é biodegradável, foi feita em laboratório externo pelo método de número 5210 conforme *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, uma vez que os laboratórios próprios não têm os equipamentos necessários para essa análise.

3.2.1.3. DQO (demanda química de oxigênio)

A demanda química de oxigênio avalia a quantidade de O_2 necessária para a oxidação de toda a matéria orgânica e de outros componentes inorgânicos por meio do método de número 5220 conforme *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. As medidas foram realizadas em laboratório externo.

3.2.1.4. COT (carbono orgânico total)

O carbono orgânico total (COT) é uma característica da água que indica a quantidade de carbono orgânico presente na amostra. A determinação foi realizada em laboratório externo conforme *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* pelo método de número 5310.

3.2.1.5. Oxigênio dissolvido

A quantidade de oxigênio dissolvido na água além de ser o indicador de outras variáveis também é um fator que influencia na interação dos reagentes com o minério durante o processo. Essa medição foi feita no laboratório de processos por meio do equipamento multipâmetros Pro-Quatro do fabricante YSI.

3.2.1.6. pH (potencial hidrogeniônico)

O potencial hidrogeniônico indica a acidez ou alcalinidade de determinada solução aquosa. A interação dos reagentes de flotação, dos agentes de coagulação e floculação são fortemente afetados pelo pH. O funcionamento desses processos depende da interação dos reagentes com as partículas minerais e isso reforça a importância do pH no processamento mineral. Essa medição foi feita no laboratório de processos por meio do equipamento multipâmetros Pro-Quatro do fabricante YSI.

3.2.1.7. Condutividade elétrica

Esse parâmetro é utilizado para avaliar indiretamente a presença de íons no meio, e que afetam o processo. Essa medição foi feita no laboratório de processos por meio do equipamento multipâmetros Pro-Quatro do fabricante YSI.

3.2.1.8. Turbidez

A turbidez foi medida por meio do turbidímetro de bancada tl2300 HACH, com amplitude de medição de 0 a 4000 NTU.

3.2.1.9. Outros elementos

A caracterização de elementos dissolvidos na água das diferentes fontes avaliadas nesse estudo foi feita via espectrometria a plasma por acoplamento indutivo (ICP-OES). Os elementos analisados foram Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si e Ti. As medidas foram realizadas em laboratório externo.

3.2.2. Características dos sólidos

3.2.2.1. Identificação de fases minerais por difratometria de raios X (DRX)

A identificação de fases minerais foi realizada por DRX, utilizando o equipamento o D2 PHASER da BRUKER equipado com detector rápido linear do tipo LYNXEYETM. A fonte de raios-X é um tubo com ânodo de cobre com linha de emissão característica de 1,54 Å / 8,047 keV (Cu-K α 1) e potência máxima de 300W (30 kV x 10 mA). Estágio padrão de amostra com ~51 mm de diâmetro (área de amostra a ser preenchida de ~25mm de diâmetro).O método de Rietveldfoi utilizado para a determinação da composição mineralógica da amostra.As amostras foram pulverizadas e analisadas no equipamento, que possui detectorde fita de Si com 160 canais.

3.2.2.2. Análise química por fluorescência de raios X (FRX)

As amostras minerais, seja alimentação, concentrado ou rejeitados testes, foram analisadas quanto às características químicas via análises por FRX (espectrometria por fluorescência de raios-X).Os elementos analisados foram Fe, Al, Si, P, Mn, Ti, Ca, Mg, Na e K.Foram utilizadoo espectrômetro de FRX Axios Fast e Axios Max ambos da MalvernPanalytical.

3.2.2.3. Morfologia por Mineralogia por microscopia óptica

A avaliação mineralógica feita por microscopia óptica em microscópio ZEISS AXIO.

3.2.2.4. Mineralogia por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A avaliação das partículas minerais presentes na amostra de minério foi feita por microscopia eletrônica da varredura em um equipamento FEI Quanta 200 FEG, do Centro de Microscopia da UFMG.

3.3. Testes de flotação

Ensaios de flotação em bancada foram conduzidos tendo como parâmetros para avaliação a recuperação de massa, a recuperação metálica, os teores de contaminantes como SiO₂ no concentrado.

Foram preparados 20 litros de água deionizada com pH 10,5, regulado com solução de hidróxido de sódio a 10 % e 10L de cada uma das águas a serem estudadas. As dosagens utilizadas foram de 1450 g/t Fe de amido (solução estoque de amido a 3%) e 150g/ton de amina (solução estoque de amina a 1%).

Inicialmente foi adicionada água com pH natural na cuba para atingir 60% de concentração de sólidos, para a etapa de condicionamento. Posteriormente a massa de minério adequada foi adicionada à cuba e agitação mantida em 350 RPM e o pH foi medido. Posteriormente, o amido foi adicionado e condicionado com o minério por 5 minutos com agitação de 1500 RPM. Após 5 minutos, o pH foi ajustado para 10,5 com solução de NaOH e adicionada a amina Flotigam 7500 da Clariant. Após 1 minuto de condicionamento com a amina, completou-se o volume da cuba com água deionizada ou de processo, em agitação de 1300 RPM. Iniciou-se o borbulhamento de ar uma vazão de 2,5 L/min iniciando assim a flotação e coletado o flotado até a exaustão (quando não há mais espuma na cuba). Quando cessou a coleta do flotado, o sistema de ar, os raspadores e o motor foram desligados. O pH final da polpa e o tempo da flotação foram registrados. Após a flotação as polpas foram filtradas e secas em estufa a 80°C durante 1 h, e pesadas e preparadas para análises químicas.

3.3.1. Cinética de flotação

Os ensaios cinéticos da flotação foram realizados seguindo o mesmo procedimento da flotação normal até sua exaustão, os flotados foram retiradas nos tempos de 30, 60, 120, 180 e 300 segundos após o início da flotação. As mesmas análises químicas foram conduzidas.

3.3.2. Ensaios de flotação com água tratada

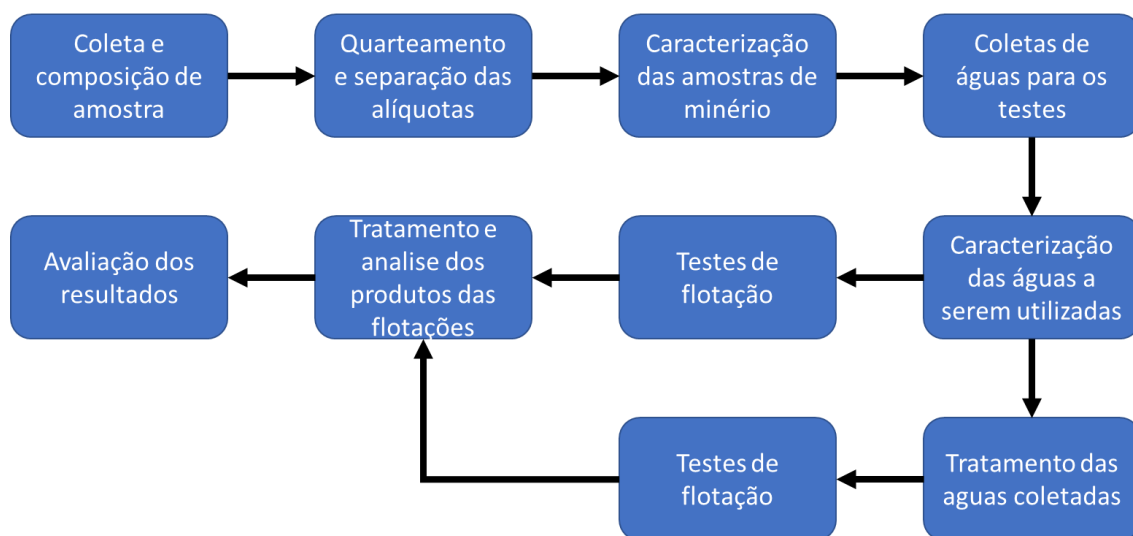
As águas, após coletadas, foram submetidas a tratamentos simplificado por filtração e clarificação das águas. A filtração foi feita em filtro de pressão do fabricante Dialmática utilizando como meio filtrante papel de filtro de tamanho máximo de poros de 3 μ m. A clarificação por meio da coagulação, floculação e sedimentação como Polydamac a 1% como reagente coagulante dosando 150g/t de poliacrilamida a 0,2% como reagente floculante dosando 50 g/t.

3.4. Metodologia global

As atividades desse estudo foram sequencia das de acordo com o esquema da Figura 03.

As alíquotas que compuseram a amostra de minério utilizada nos testes foram coletadas em vários dias, diretamente dos amostradores industriais que amostram a alimentação da planta de flotação, antes da adição dos reagentes, coletores e depressores utilizados no processo, de modo a não ter influência das dosagens desses produtos.

Figura 03 - Diagrama de blocos de etapas da atividade experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Após a coleta essas amostras foram secadas em estufa com temperatura entre 80 e 120°C, homogeneizadas em pilhas cônicas e quarteadas em partes, para obter a amostra a ser utilizada nos testes de flotação. O processo de validação das amostras geradas para os testes se deu após a homogeneização e quarteamento após selecionadas aleatoriamente 52 alíquotas, representando aproximadamente 5% da massa total preparada, e estas foram encaminhadas para análise.

Destaca-se que a coleta das águas foi realizada anteriormente aos ensaios, evitando ao máximo o armazenamento prolongado das amostras para que não fossem perdidas as características por envelhecimento da água. Os testes foram efetuados cronologicamente por tipo de água e não por tipo de análise;

Todos os ensaios foram realizados nos laboratórios da Anglo American, em Conceição do Mato Dentro e algumas análises de águas foram realizadas em laboratório externo- Bioagri Laboratórios Ltda.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Caracterização física, química e mineralógica das amostras do minério

A Tabela 01 apresenta os resultados da análise química de todas as amostras utilizadas no presente trabalho para avaliar a homogeneidade química do lote. Com base nos resultados das análises obtidas, foi calculada a variabilidade da composição química, cujos parâmetros estão apresentados na Tabela 02.

Portanto, as amostras utilizadas apresentam majoritariamente 42,41% em Fe, 38,50% em SiO₂, e minoritários, 0,42% em Al₂O₃, 0,02% em P, 0,02% em Mn, 0,05% em TiO₂, 0,01 % em CaO, 0,10% em Na₂O e 0,10% em K₂O.

Observa-se que o processo de produção da amostra padrão a ser utilizada nos estudos de flotação apresenta qualidade aceitável, uma vez que a diferença entre o máximo e o mínimo dos teores observados para o Fe e a SiO₂ representam menos de 5 % do valor mínimo obtido na análise química. Para essa validação apenas os teores de Fe e SiO₂ foram utilizados, em virtude de serem os componentes principais, os únicos com mais de 1% na composição da amostra.

O minério utilizado nos testes foi caracterizado mineralogicamente por meio de microscopia óptica, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura.

Com base nos resultados das análises químicas obtidas, foi calculada a variabilidade da composição química, cujos parâmetros estão apresentados na Tabela 2.

A Tabela 03 apresenta a composição mineralógica obtida. Observa-se que, majoritariamente, o mineral portador de ferro é a hematita e a ganga é principalmente quartzo. Pela microscopia óptica (Tabela 04), foi possível verificar que a hematita lamelar predomina na amostra, seguida pela granular e minoritariamente pela lobular, ilustradas na Figura 4. Portanto, a amostra é uma mistura binária de minerais, com hematita e quartzo majoritariamente.

Tabela 01 – Composição química das amostras utilizadas no presente estudo

| Identificação da amostra | Fe (%) | Al ₂ O ₃ (%) | SiO ₂ (%) | P (%) | Mn (%) | TiO ₂ (%) | CaO (%) | MgO (%) | Na ₂ O (%) | K ₂ O (%) |
|--------------------------|--------|------------------------------------|----------------------|-------|--------|----------------------|---------|---------|-----------------------|----------------------|
| 01 | 42,31 | 0,39 | 38,42 | 0,015 | 0,016 | 0,05 | 0,01 | 0,013 | 0,1 | 0,01 |
| 02 | 42,35 | 0,41 | 38,31 | 0,016 | 0,017 | 0,051 | 0,01 | 0,021 | 0,100 | 0,100 |
| 03 | 42,35 | 0,39 | 38,66 | 0,015 | 0,016 | 0,049 | 0,01 | 0,022 | 0,100 | 0,100 |
| 04 | 42,21 | 0,38 | 38,17 | 0,015 | 0,016 | 0,05 | 0,01 | 0,022 | 0,100 | 0,100 |
| 05 | 42,29 | 0,38 | 38,57 | 0,015 | 0,016 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,100 | 0,100 |
| 06 | 42,30 | 0,43 | 38,19 | 0,015 | 0,016 | 0,049 | 0,011 | 0,017 | 0,100 | 0,100 |
| 07 | 42,16 | 0,38 | 38,52 | 0,015 | 0,016 | 0,048 | 0,01 | 0,01 | 0,100 | 0,100 |
| 08 | 42,18 | 0,39 | 38,19 | 0,015 | 0,018 | 0,05 | 0,01 | 0,017 | 0,100 | 0,100 |
| 09 | 42,44 | 0,39 | 38,2 | 0,014 | 0,016 | 0,051 | 0,011 | 0,019 | 0,100 | 0,100 |
| 10 | 42,36 | 0,39 | 38,43 | 0,015 | 0,017 | 0,054 | 0,01 | 0,018 | 0,100 | 0,100 |
| 11 | 42,32 | 0,39 | 38,39 | 0,015 | 0,015 | 0,05 | 0,01 | 0,015 | 0,100 | 0,100 |
| 12 | 42,12 | 0,4 | 38,32 | 0,015 | 0,017 | 0,051 | 0,01 | 0,02 | 0,100 | 0,100 |
| 13 | 42,01 | 0,39 | 38,42 | 0,015 | 0,016 | 0,051 | 0,01 | 0,01 | 0,100 | 0,100 |
| 14 | 42,31 | 0,38 | 38,48 | 0,015 | 0,017 | 0,052 | 0,01 | 0,013 | 0,100 | 0,100 |
| 15 | 42,28 | 0,37 | 38,36 | 0,015 | 0,016 | 0,051 | 0,01 | 0,012 | 0,100 | 0,100 |
| 16 | 42,66 | 0,39 | 38,87 | 0,016 | 0,017 | 0,053 | 0,01 | 0,012 | 0,100 | 0,100 |
| 17 | 42,48 | 0,38 | 38,49 | 0,015 | 0,017 | 0,052 | 0,01 | 0,013 | 0,100 | 0,100 |
| 18 | 42,03 | 0,37 | 38,73 | 0,015 | 0,017 | 0,049 | 0,01 | 0,01 | 0,100 | 0,100 |
| 19 | 42,15 | 0,37 | 38,58 | 0,015 | 0,016 | 0,052 | 0,01 | 0,014 | 0,100 | 0,100 |
| 20 | 42,24 | 0,37 | 38,29 | 0,015 | 0,017 | 0,051 | 0,01 | 0,017 | 0,100 | 0,100 |
| 21 | 42,16 | 0,37 | 38,29 | 0,015 | 0,017 | 0,052 | 0,01 | 0,012 | 0,100 | 0,100 |
| 22 | 42,92 | 0,37 | 37,64 | 0,015 | 0,017 | 0,052 | 0,01 | 0,016 | 0,100 | 0,100 |
| 23 | 42,3 | 0,37 | 38,04 | 0,015 | 0,017 | 0,052 | 0,01 | 0,017 | 0,100 | 0,100 |
| 24 | 42,49 | 0,46 | 38,68 | 0,015 | 0,017 | 0,048 | 0,013 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 25 | 42,51 | 0,5 | 38,87 | 0,015 | 0,018 | 0,051 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 26 | 42,56 | 0,43 | 38,26 | 0,016 | 0,016 | 0,049 | 0,011 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 27 | 42,46 | 0,43 | 38,81 | 0,015 | 0,017 | 0,049 | 0,011 | 0,013 | < 0,10 | < 0,100 |
| 28 | 42,57 | 0,46 | 38,63 | 0,015 | 0,016 | 0,05 | 0,012 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 29 | 42,57 | 0,52 | 38,51 | 0,015 | 0,016 | 0,053 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 30 | 42,44 | 0,42 | 38,57 | 0,015 | 0,017 | 0,051 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 31 | 42,74 | 0,42 | 38,93 | 0,016 | 0,018 | 0,052 | 0,011 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 32 | 42,4 | 0,42 | 38,42 | 0,015 | 0,017 | 0,048 | 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 33 | 42,48 | 0,43 | 38,86 | 0,015 | 0,016 | 0,051 | 0,01 | 0,011 | < 0,10 | < 0,100 |
| 34 | 42,57 | 0,45 | 38,59 | 0,015 | 0,017 | 0,049 | 0,012 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 35 | 42,75 | 0,43 | 38,56 | 0,016 | 0,017 | 0,053 | 0,011 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 36 | 42,26 | 0,42 | 38,52 | 0,015 | 0,015 | 0,052 | 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 37 | 42,34 | 0,43 | 38,39 | 0,014 | 0,016 | 0,046 | 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 38 | 42,26 | 0,42 | 38,27 | 0,015 | 0,016 | 0,049 | 0,011 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 39 | 42,61 | 0,49 | 38,62 | 0,014 | 0,017 | 0,048 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 40 | 42,53 | 0,44 | 38,57 | 0,014 | 0,017 | 0,051 | 0,011 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 41 | 42,5 | 0,43 | 38,77 | 0,016 | 0,017 | 0,053 | 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 42 | 42,59 | 0,43 | 38,5 | 0,015 | 0,017 | 0,053 | 0,011 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 43 | 42,64 | 0,5 | 38,46 | 0,014 | 0,019 | 0,053 | 0,011 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 44 | 42,31 | 0,42 | 38,21 | 0,014 | 0,016 | 0,049 | 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 45 | 42,32 | 0,42 | 38,58 | 0,014 | 0,017 | 0,05 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 46 | 42,46 | 0,43 | 38,76 | 0,014 | 0,016 | 0,051 | 0,011 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 47 | 42,42 | 0,43 | 38,66 | 0,015 | 0,017 | 0,051 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 48 | 42,32 | 0,48 | 38,96 | 0,016 | 0,015 | 0,053 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 49 | 42,59 | 0,44 | 38,52 | 0,015 | 0,016 | 0,051 | 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 50 | 42,56 | 0,43 | 38,71 | 0,015 | 0,017 | 0,047 | 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 51 | 42,47 | 0,43 | 38,76 | 0,015 | 0,017 | 0,05 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| 52 | 42,54 | 0,42 | 38,61 | 0,015 | 0,017 | 0,051 | 0,011 | < 0,01 | < 0,10 | < 0,100 |
| Média | 42,41 | 0,42 | 38,50 | 0,01 | 0,02 | 0,051 | 0,01 | 0,02 | 0,100 | 0,100 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 02 – Análise Estatística da variabilidade da composição química das amostras utilizadas dos testes de flotação

| Variável | Média | Desvio Padrão | Coef Var. | Mínimo | Q1 | Mediana | Q3 | Máximo | Δ (Máx.-Mín.) | Δ /Mín. *100 |
|--------------------------------|-------|---------------|-----------|--------|-------|---------|-------|--------|----------------------|---------------------|
| Fe | 42,41 | 0,19 | 0,44 | 42,01 | 42,29 | 42,40 | 42,56 | 42,92 | 0,91 | 2,20 |
| Al ₂ O ₃ | 0,42 | 0,04 | 8,88 | 0,37 | 0,39 | 0,42 | 0,43 | 0,52 | 0,15 | 40,50 |
| SiO ₂ | 38,50 | 0,25 | 0,65 | 37,64 | 38,32 | 38,52 | 38,66 | 38,96 | 1,32 | 3,50 |
| P | 0,01 | 0,00 | 3,65 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 14,30 |
| Mn | 0,02 | 0,00 | 4,68 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 26,70 |
| TiO ₂ | 0,05 | 0,00 | 3,39 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,01 | 17,40 |
| CaO | 0,01 | 0,00 | 5,58 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 20,00 |
| MgO | 0,02 | 0,00 | 25,14 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 120,00 |
| Na ₂ O | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,00 | 0,00 |
| K ₂ O | 0,10 | 0,02 | 19,53 | 0,01 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,09 | 900,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 03 – Fases minerais presentes nas amostras da alimentação da flotação por Difractometria de Raios X

| Caracterização mineralógica da amostra de alimentação da flotação | | | | | | | | |
|---|---------------|--------------|-------------|--------------|---------------|---------------|------------|-------------|
| Hematita (%) | Magnetita (%) | Goethita (%) | Quartzo (%) | Gibbsita (%) | Caulinita (%) | Moscovita (%) | Rutilo (%) | Clorita (%) |
| 55,74 | 0,01 | 1,50 | 40,55 | 0,31 | 0,56 | 0,75 | 0,25 | 0,34 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

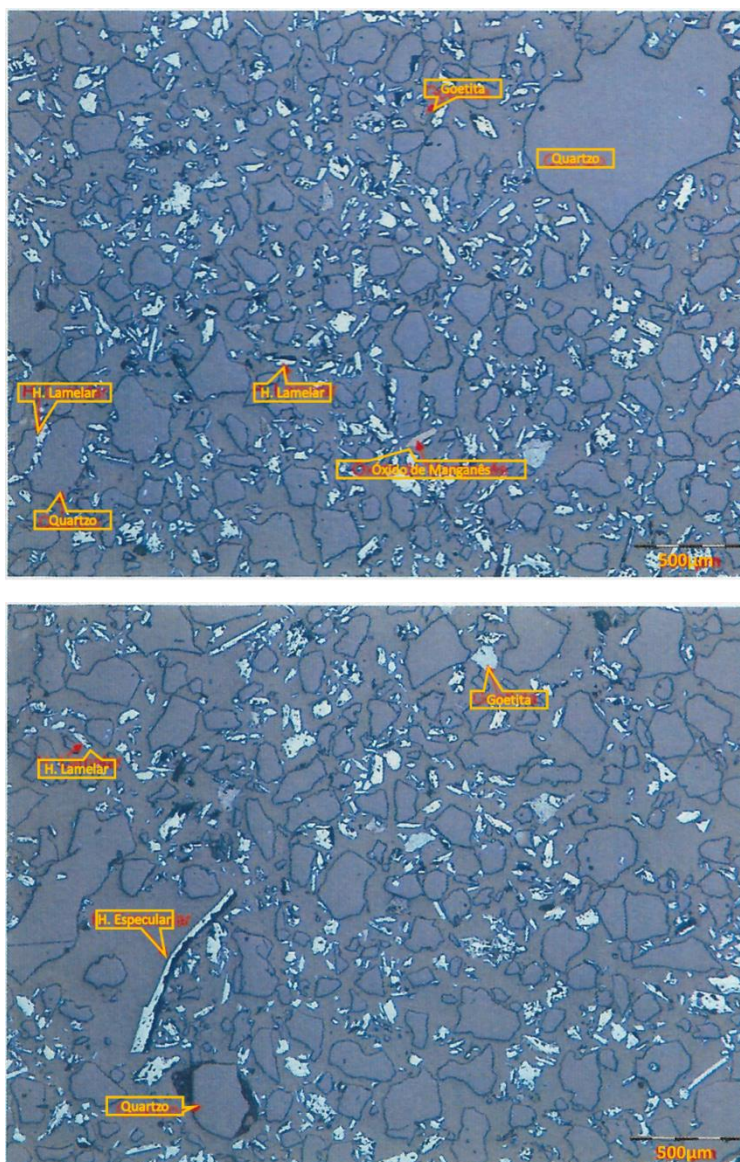
A microscopia ótica mostra, além da quantificação dos minerais mostrados na tabela 04, a morfologia dos minerais. Pode-se perceber que em sua grande maioria a amostra é composta por hematita e quartzo e que as partículas de quartzo usualmente são maiores do que as de hematita.

Tabela 04–Análise mineralógica via microscopia óptica do minério utilizado nos testes

| Caracterização mineralógica por microscopia óptica (% minerais em peso) | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|----------------|-------------------|---------------|-------------------------|----------------------|-------------|-------------------|---------------|--------------|-----------------------|------------|
| H. Lamelar (%) | H. Granular (%) | H. Lobular (%) | H. em Martita (%) | Magnetita (%) | Goethita botrioidal (%) | Goethita terrosa (%) | Quartzo (%) | Filossilicato (%) | Caulinita (%) | Gibbsita (%) | Óxido de Manganês (%) | Outros (%) |
| 43,85 | 8,15 | 1,76 | 0,22 | 0 | 3,18 | 1,91 | 39,63 | 0,35 | 0,11 | 0,49 | 0,2 | 0,13 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

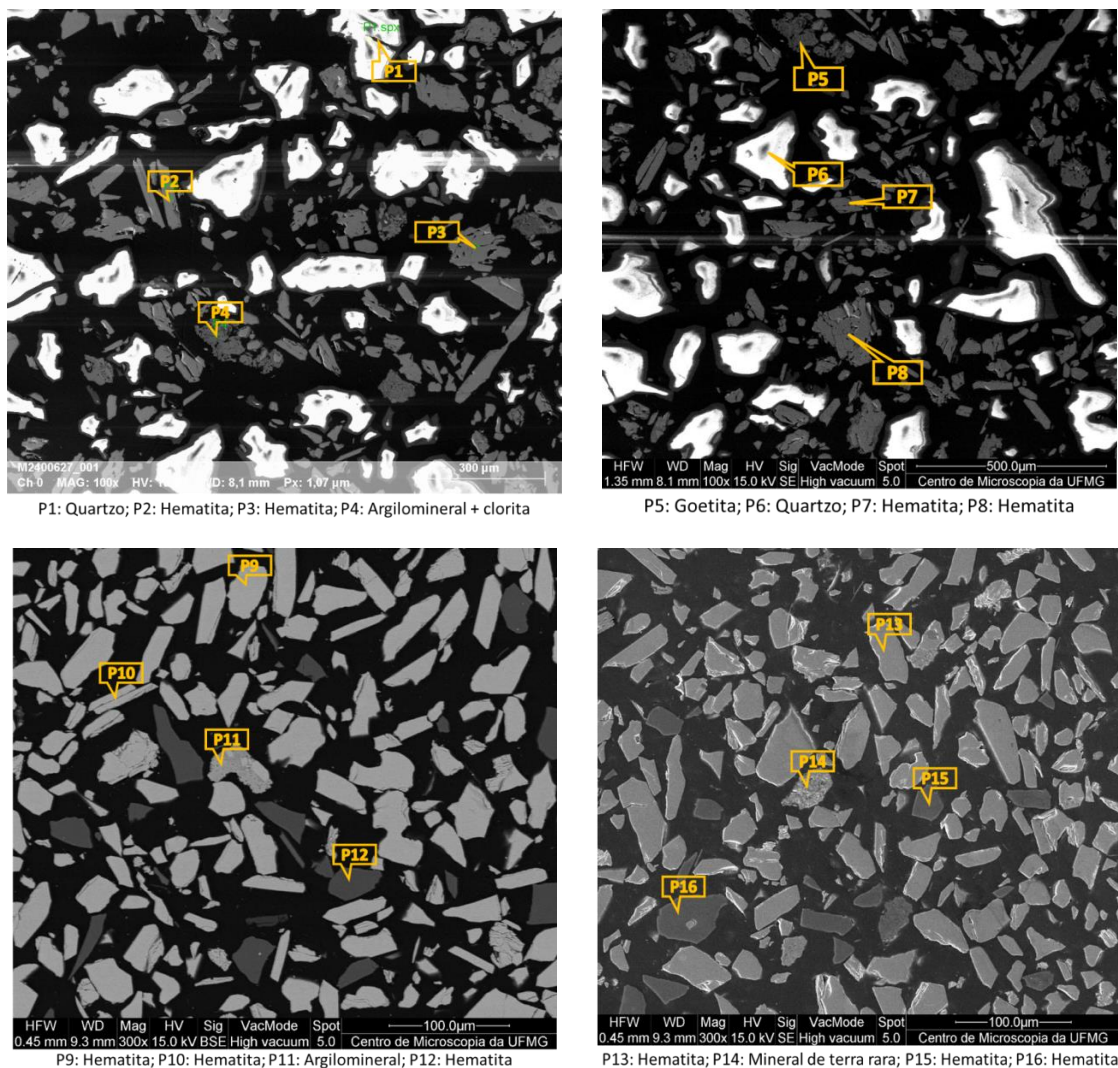
Figura 04 – Imagens do microscópio óptico da amostra do minério



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A análise de MEV na figura 05, confirma que os grãos de quartzo se apresentam em maior granulometria que os grãos de hematita, conforme observado na microscopia óptica. Quantidades pequenas de argilominerais também podem ser observadas.

Figura 05 –Imagens de microscopia eletrônica de varredura das amostras de minério



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.2. Águas utilizadas nos testes

Conforme já colocado na metodologia, foram utilizadas águas de quatro origens distintas: (i) água deionizada, (ii) água do rio do peixe, (iii) água do overflow dos espessadores e (iv) água da barragem de rejeitos, coletadas ao longo do ano de 2023. Foram realizadas 42 coletas discriminadas na Tabela 05. A variabilidade dos parâmetros é apresentada na Figura 06.

Vale ressaltar que cada observação dos gráficos é um dia de coleta de águas. As

análises de elementos na água deionizada mostram que em alguns momentos ocorreram contaminações nas amostras de água, mesmo que em quantidades pequenas, como no caso do alumínio, que se manteve em valores menores que 0,5 mg/L, ou em quantidades um pouco maiores, como no caso do sódio onde foram observados valores de até 6 mg/L.

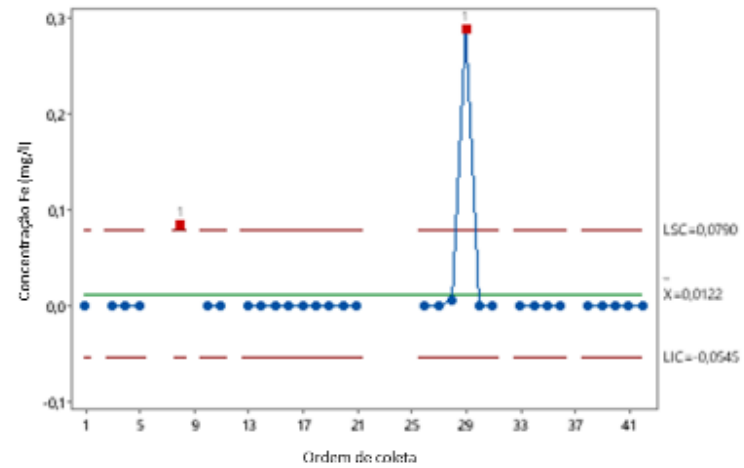
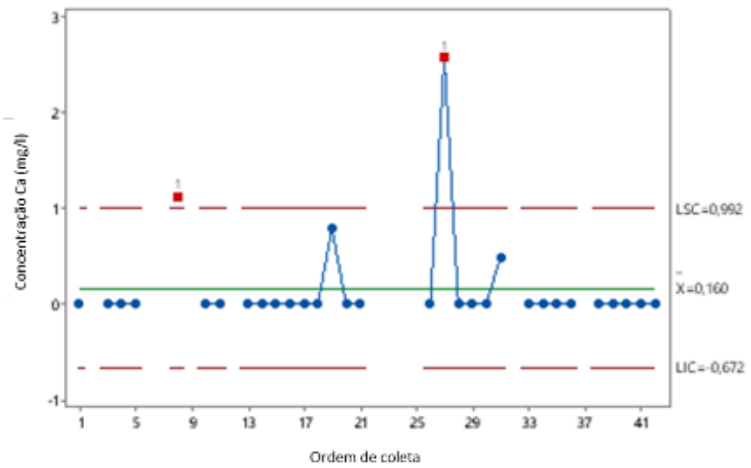
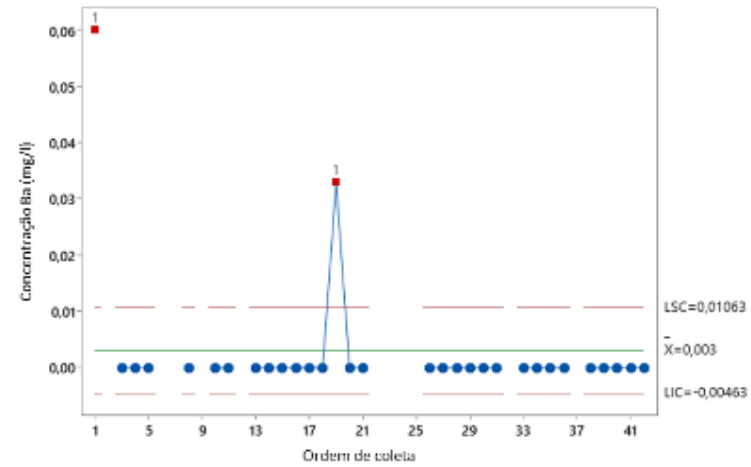
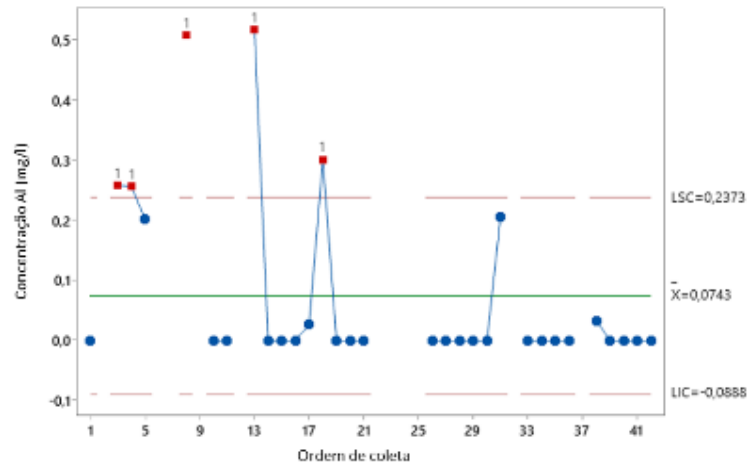
Tabela 05– Datas das coletas de águas e testes de flotação

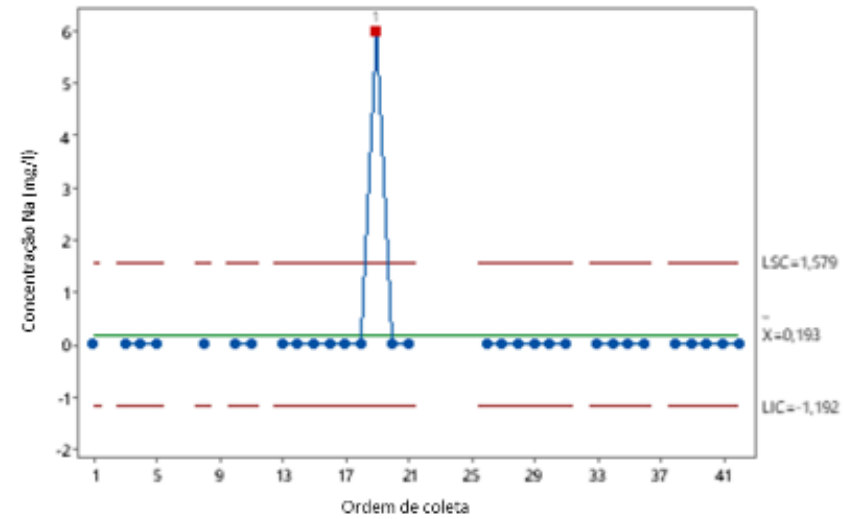
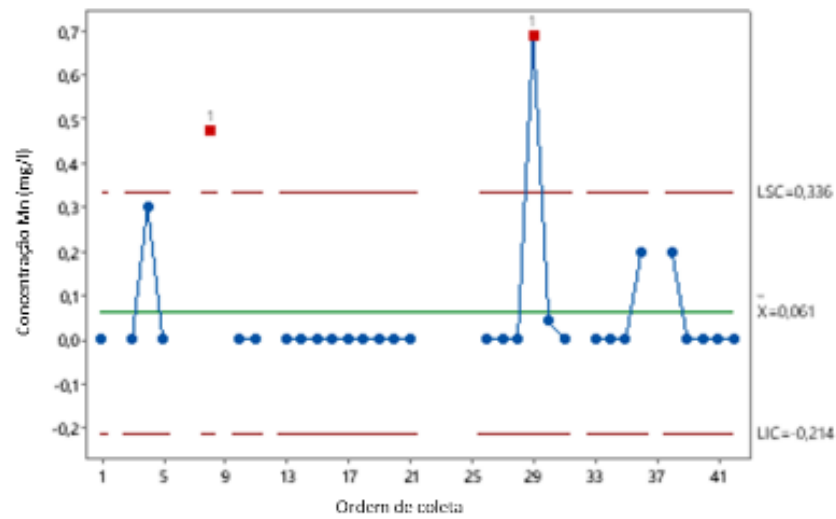
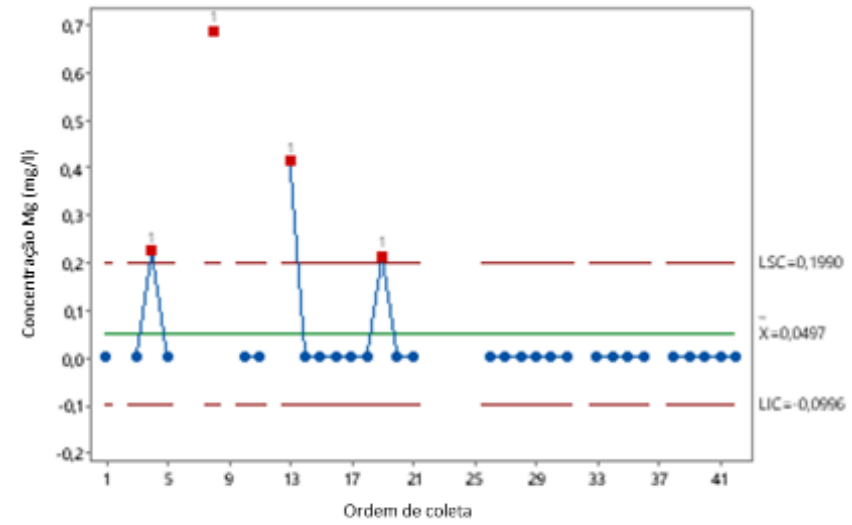
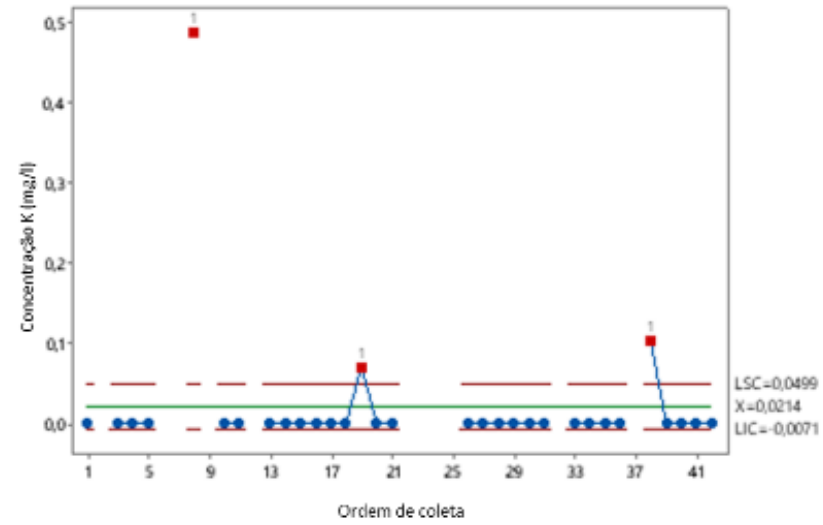
| Coletas e testes de flotação com diferentes águas | | | | Coletas e testes de flotação com diferentes águas | | | |
|---|----------------|--------|---------|---|----------------|--------|----------|
| Nº | Data da coleta | Nº/mês | Mês | Nº | Data da coleta | Nº/mês | Mês |
| 1 | 03/01/2023 | 1 | Janeiro | 22 | 07/06/2023 | 1 | Junho |
| 2 | 09/01/2023 | 2 | | 23 | 12/06/2023 | 2 | |
| 3 | 20/01/2023 | 3 | | 24 | 22/06/2023 | 3 | |
| 4 | 25/01/2023 | 4 | | 25 | 05/07/2023 | 1 | Julho |
| 5 | 02/02/2023 | 1 | 26 | 10/07/2023 | 2 | | |
| 6 | 09/02/2023 | 2 | 27 | 17/07/2023 | 3 | | |
| 7 | 13/02/2023 | 3 | 28 | 24/07/2023 | 4 | | |
| 8 | 02/03/2023 | 1 | 29 | 31/07/2023 | 5 | | |
| 9 | 09/03/2023 | 2 | Março | 30 | 07/08/2023 | 1 | Agosto |
| 10 | 16/03/2023 | 3 | | 31 | 14/08/2023 | 2 | |
| 11 | 20/03/2023 | 4 | | 32 | 21/08/2023 | 3 | |
| 12 | 28/03/2023 | 5 | | 33 | 28/08/2023 | 4 | |
| 13 | 06/04/2023 | 1 | Abril | 34 | 05/09/2023 | 1 | Setembro |
| 14 | 11/04/2023 | 2 | | 35 | 11/09/2023 | 2 | |
| 15 | 17/04/2023 | 3 | | 36 | 02/10/2023 | 1 | Outubro |
| 16 | 24/04/2023 | 4 | | 37 | 09/10/2023 | 2 | |
| 17 | 03/05/2023 | 1 | Maio | 38 | 16/10/2023 | 3 | |
| 18 | 08/05/2023 | 2 | | 39 | 23/10/2023 | 4 | |
| 19 | 15/05/2023 | 3 | | 40 | 30/10/2023 | 5 | |
| 20 | 22/05/2023 | 4 | | 41 | 02/11/2023 | 1 | Novembro |
| 21 | 29/05/2023 | 5 | | 42 | 06/11/2023 | 2 | |

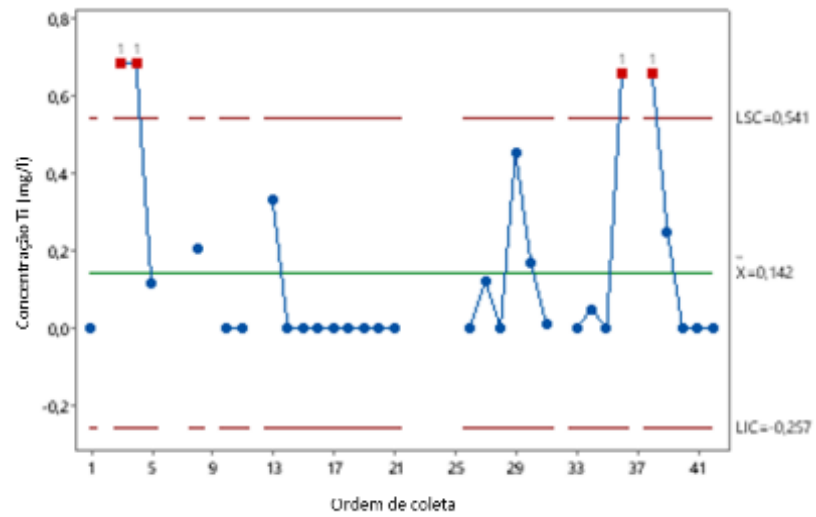
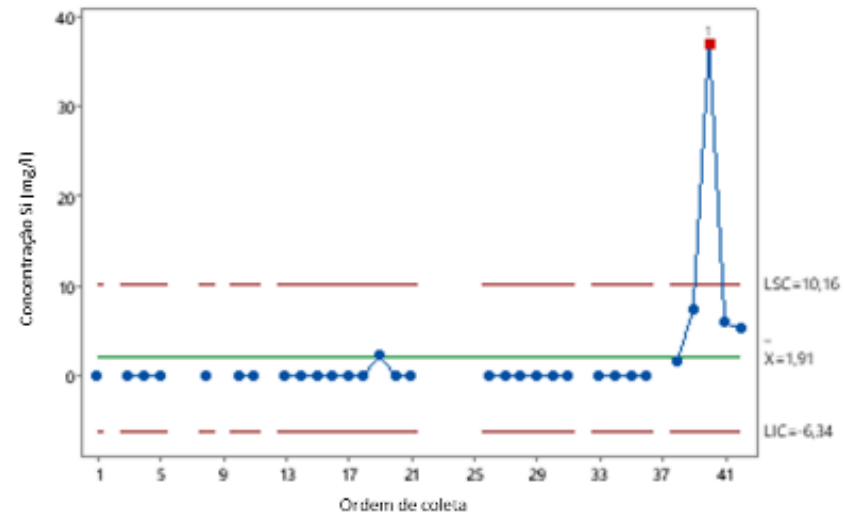
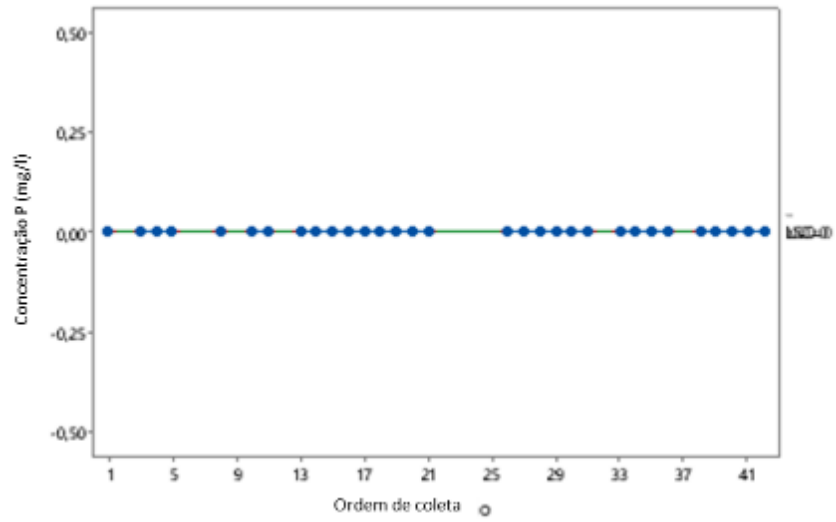
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A água do Rio do Peixe foi coletada na usina no ponto de adição aos tanques de água que alimentam a usina de beneficiamento. Foram realizados 21 testes de flotação válidos para essa água nesse estudo. A variabilidade das concentrações de Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si e Tialisados para essa água é apresentada na Figura 07. Os parâmetros orgânicos são apresentados na Tabela 06.

Figura 06 – Variabilidade das concentrações de diversos elementos (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si e Ti) na água deionizada nas diversas coletas.

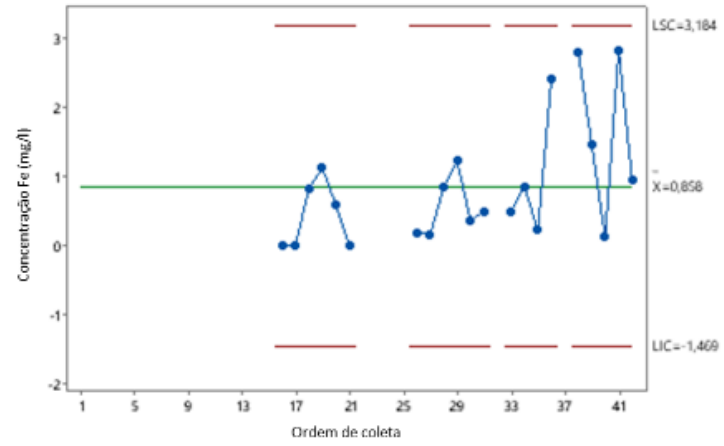
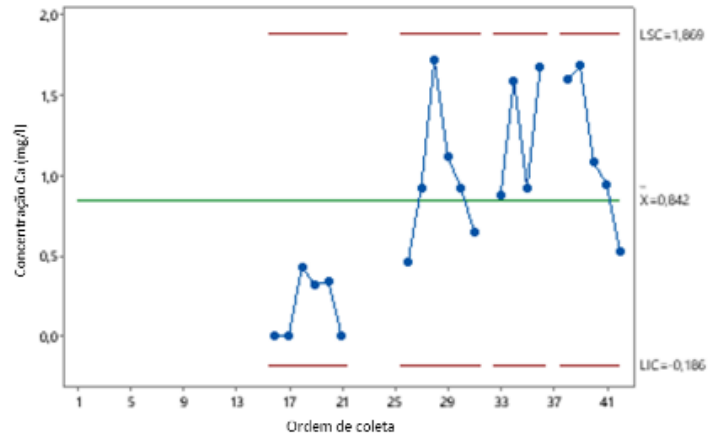
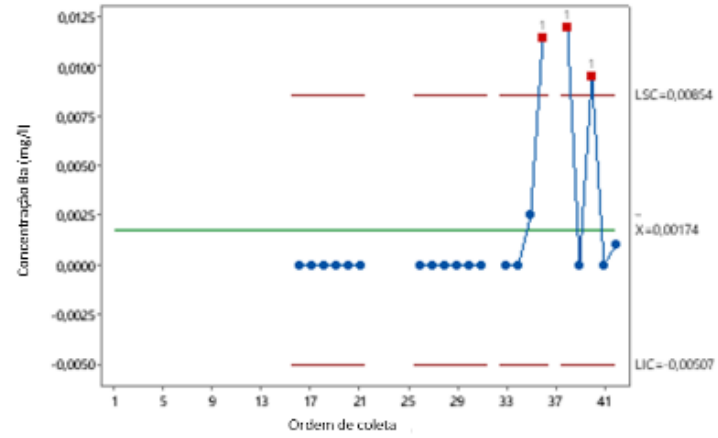
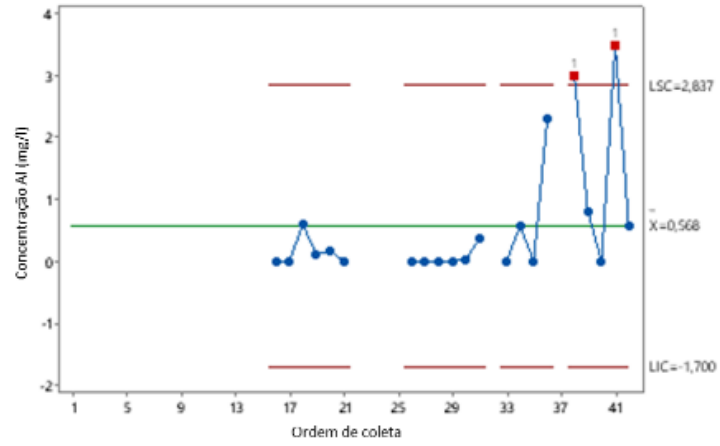


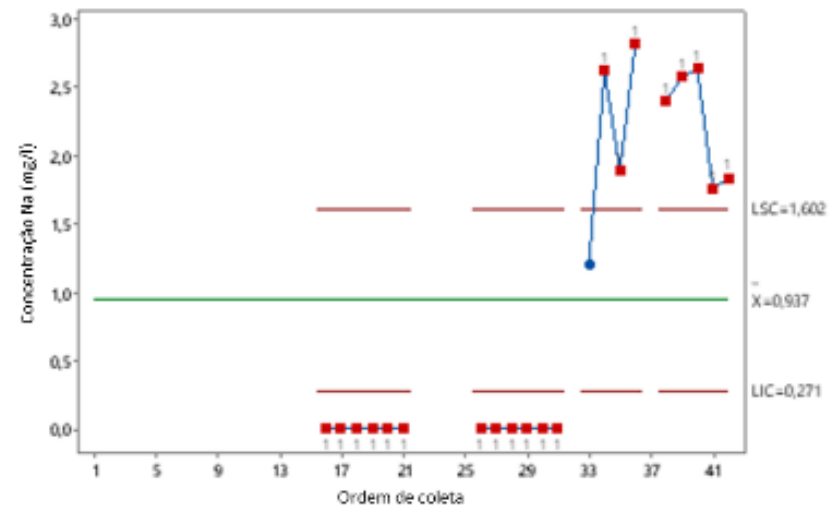
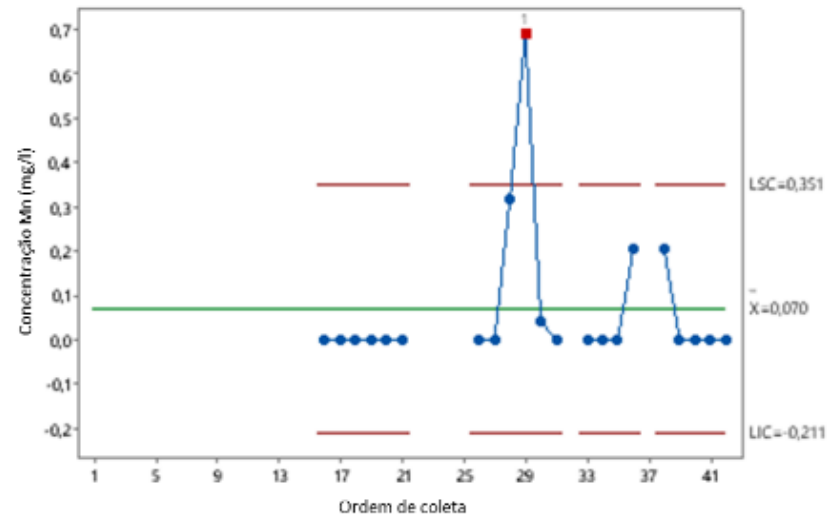
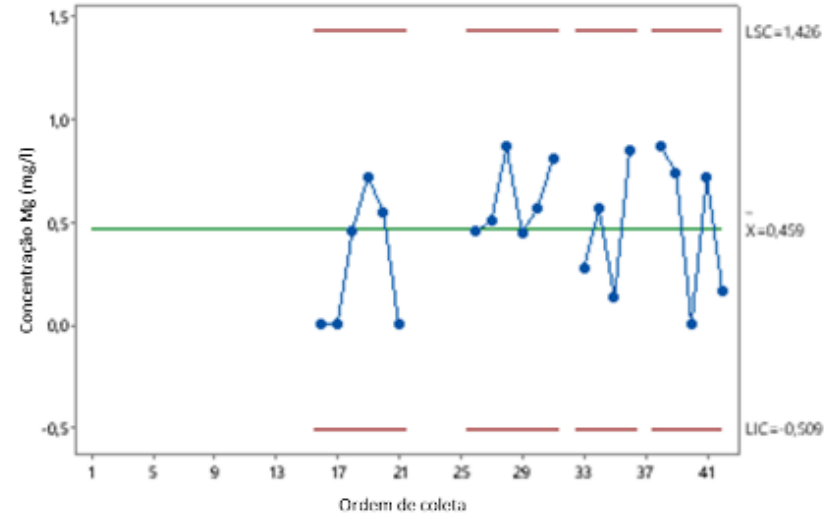
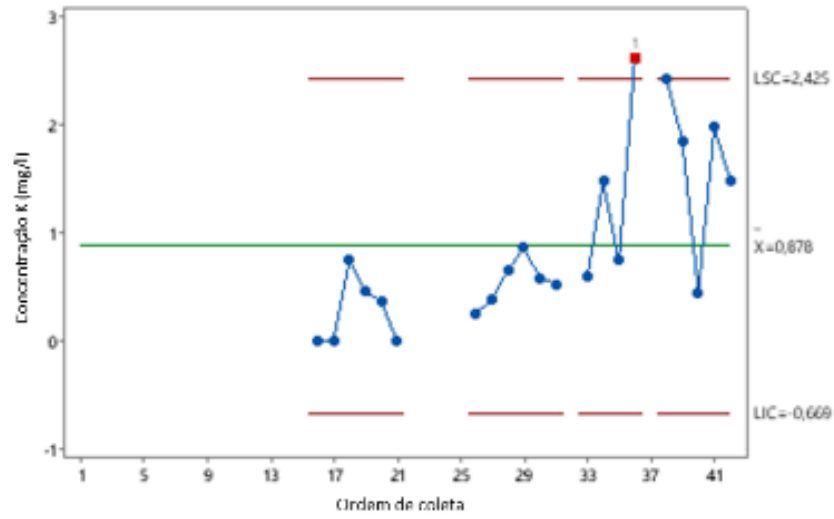


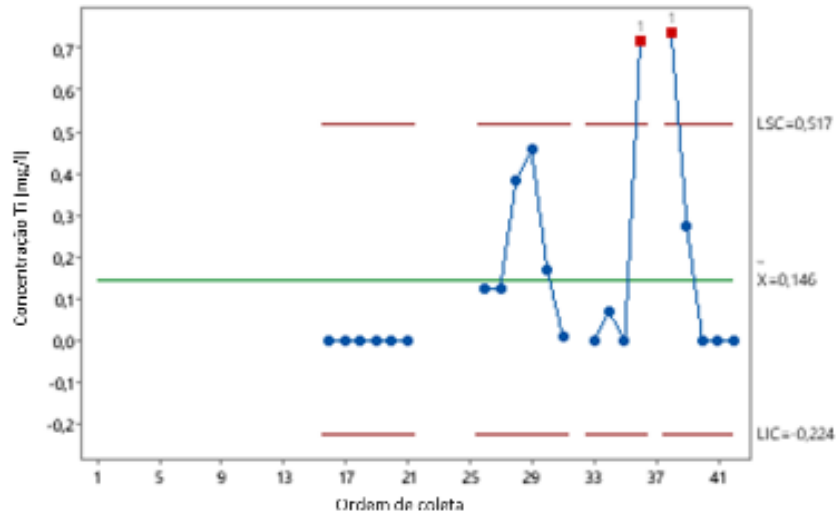
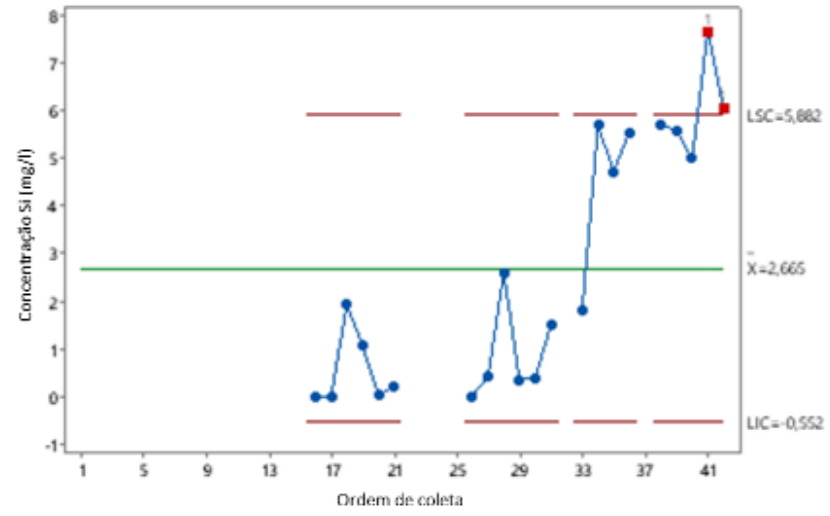
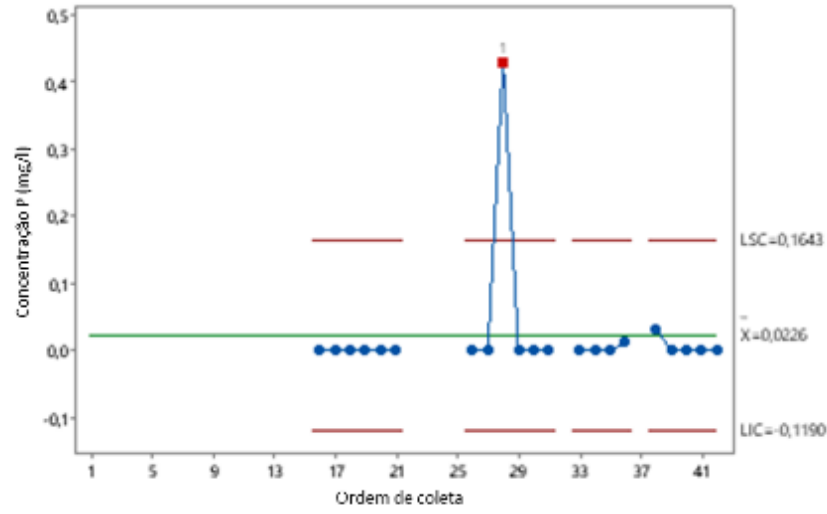


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 07 – Variabilidade das concentrações de diversos elementos (Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si e Ti) nas diversas coletas da água do Rio do Peixe







Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 06 – Parâmetros orgânicos da água do Rio do Peixe

| Data da coleta | DBO Rio do Peixe (mg/L) | DQO Rio do Peixe (mg/L) | Carbono Orgânico Total Rio do Peixe (mg/L) |
|----------------|-------------------------|-------------------------|--|
| 08/05/2023 | 3 | 63,6 | 1,7 |
| 22/05/2023 | <2,2 | <5 | <1 |
| 07/06/2023 | <2,2 | 58,5 | 1,2 |
| 22/06/2023 | 2,2 | 8,4 | <1 |
| 05/07/2023 | <2,2 | <5 | 1,2 |
| 24/07/2023 | <2,2 | <5 | 1,6 |
| 21/08/2023 | <2,2 | <5 | 1,8 |
| 11/09/2023 | <2,2 | 6,3 | 3 |
| 02/10/2023 | <2,2 | 5,6 | 3,8 |
| 16/10/2023 | <2,2 | <5 | 2,8 |
| Média | 2,60 | 28,48 | 2,14 |
| Desv. Pad. | 0,40 | 26,66 | 0,89 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

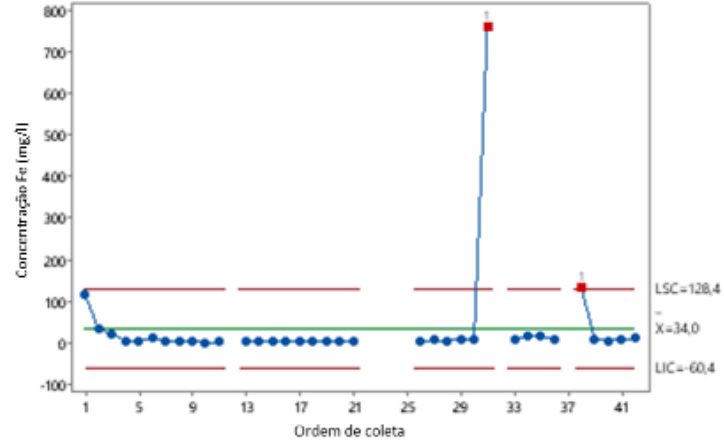
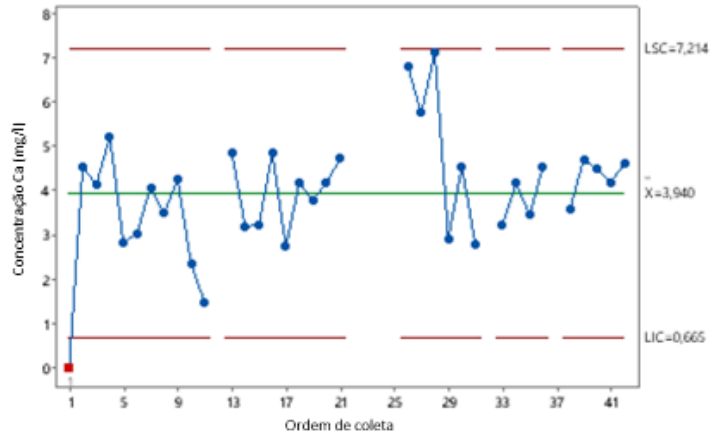
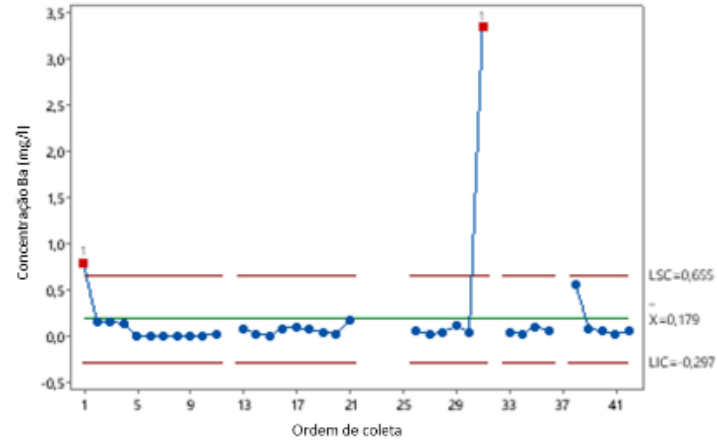
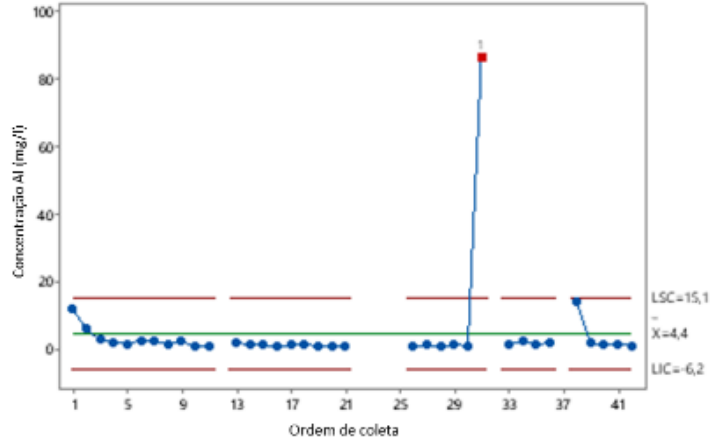
Avaliando-se as concentrações de elementos na água do Rio do Peixe observa-se que essas concentrações são maiores no segundo semestre, devido às condições ambientais, como chuvas e período seco. A água do overflow dos espessadores foi utilizada em 35 testes de flotação, com características orgânicas na Tabela 07 e inorgânicas na Figura 08. A água da barragem de rejeitos foi usada em 35 testes (características da Figura 09).

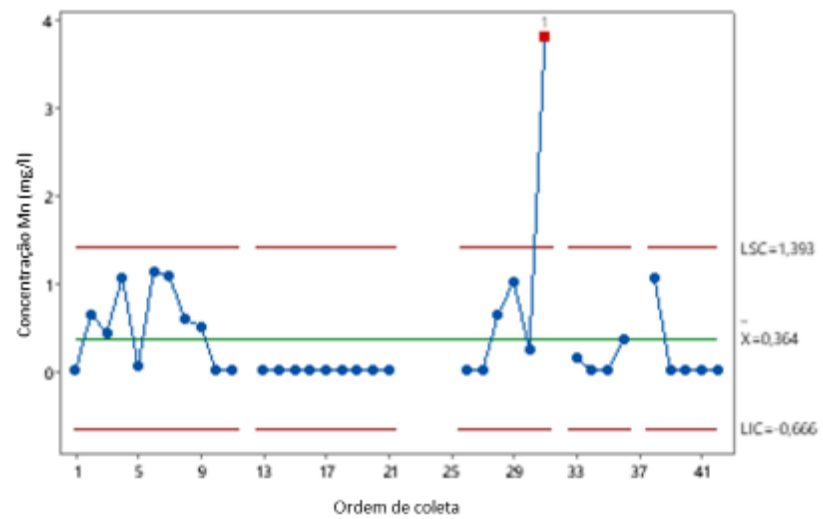
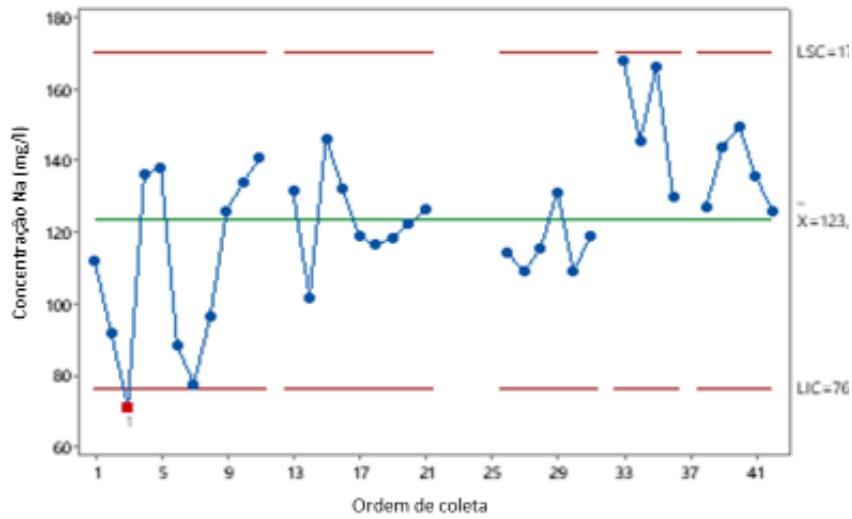
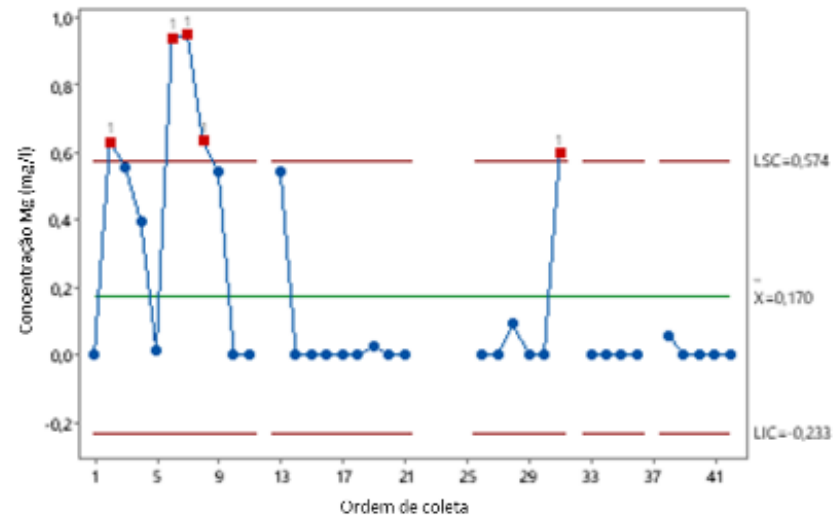
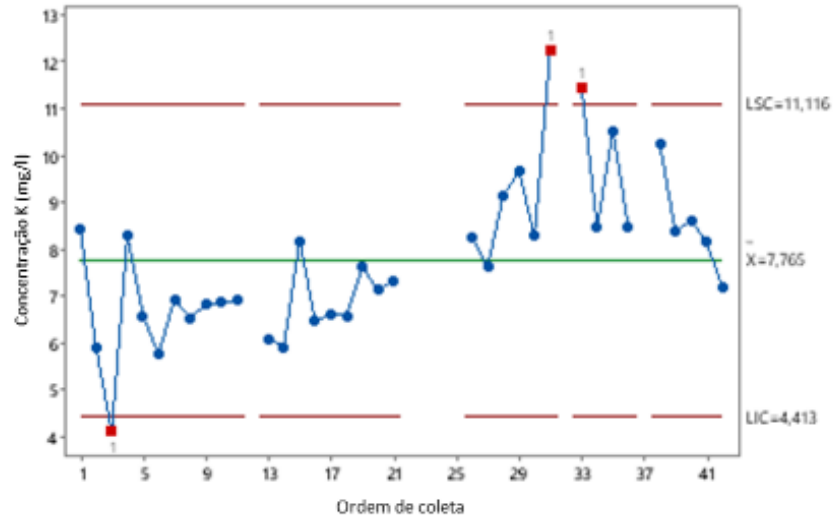
Tabela 07 – Parâmetros orgânicos da água do overflow dos espessadores

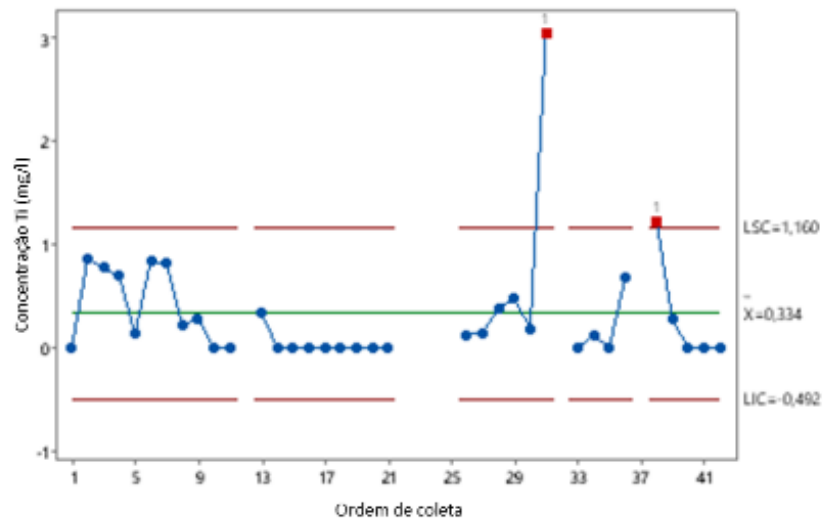
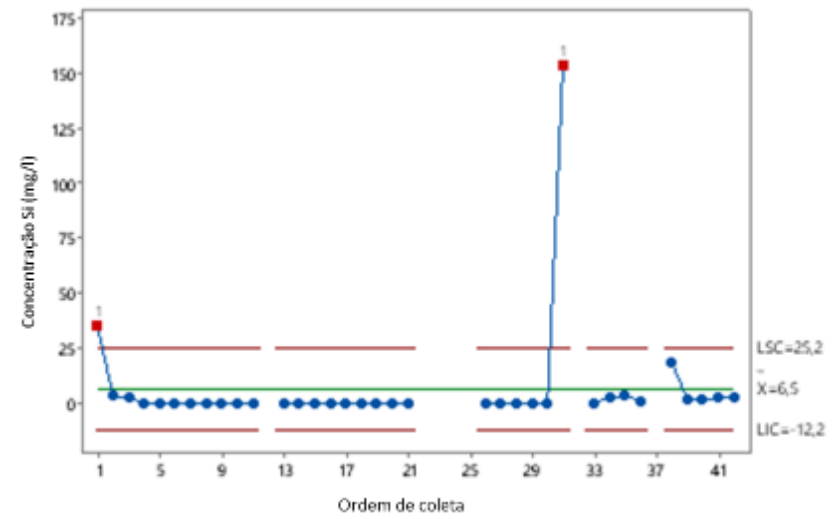
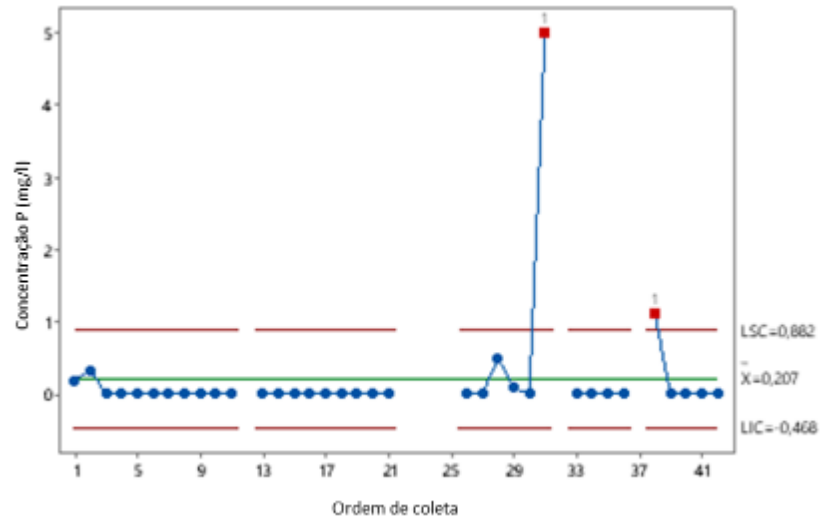
| Data | DBO Espessador (mg/L) | DQO Espessador (mg/L) | Carbono Orgânico Total Espessador (mg/L) |
|------------|-----------------------|-----------------------|--|
| 08/05/2023 | 4,7 | <5 | 9,1 |
| 22/05/2023 | 4,7 | 20 | 8,2 |
| 07/06/2023 | 9,2 | 72,4 | 9,4 |
| 22/06/2023 | 3,3 | 17,8 | 5,5 |
| 05/07/2023 | <2,2 | 18,9 | 7,8 |
| 24/07/2023 | 3,7 | 43,2 | 10,4 |
| 21/08/2023 | 7,5 | 111 | 15,3 |
| 11/09/2023 | 5,1 | 46,2 | 10 |
| 02/10/2023 | 12,2 | 41,5 | 13 |
| 16/10/2023 | 5,3 | 52,4 | 12,2 |
| Média | 6,19 | 47,04 | 10,09 |
| Desv. Pad. | 2,75 | 28,26 | 2,67 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Figura 08 - Variabilidade das concentrações de diversos elementos (Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P,Si e Ti), nas diversas coletas da água do overflow dos espessadores.

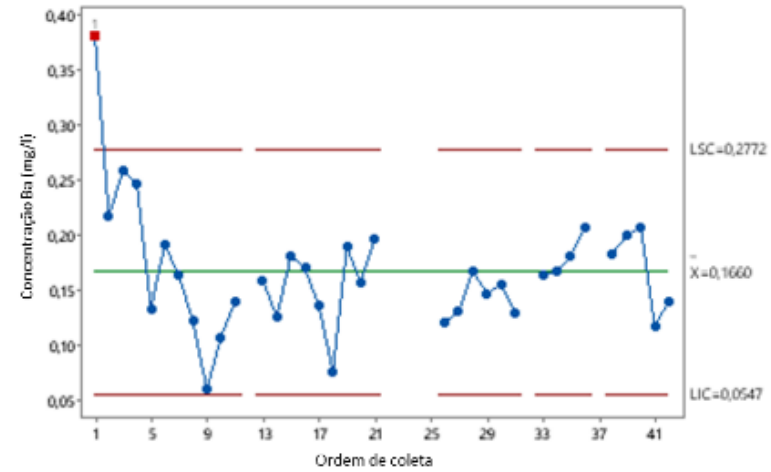
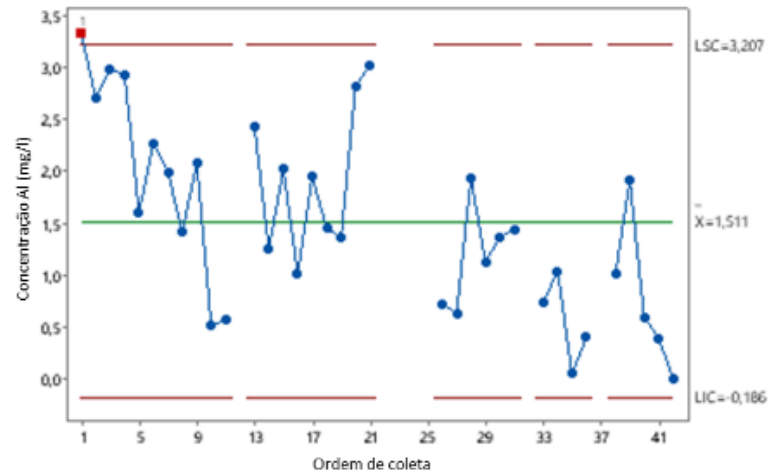


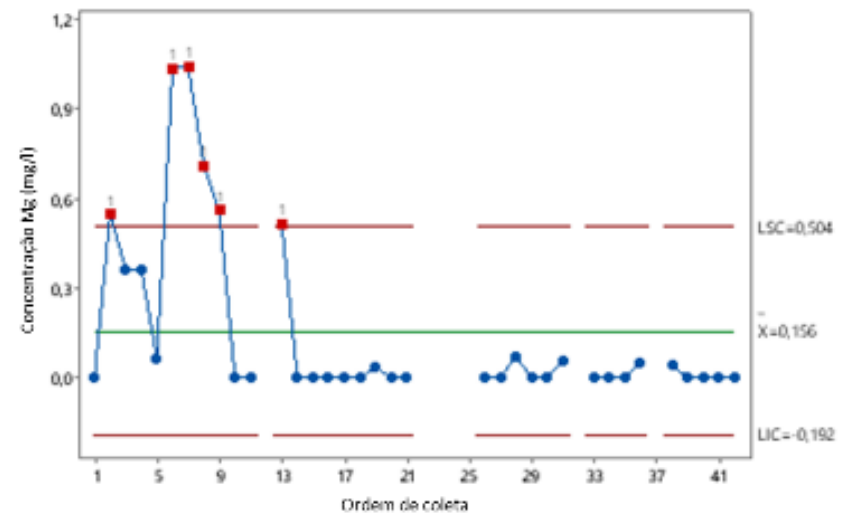
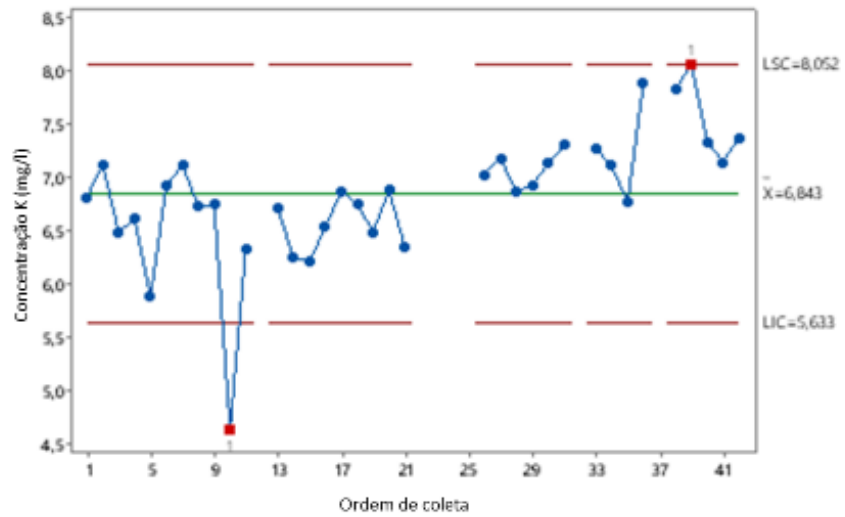
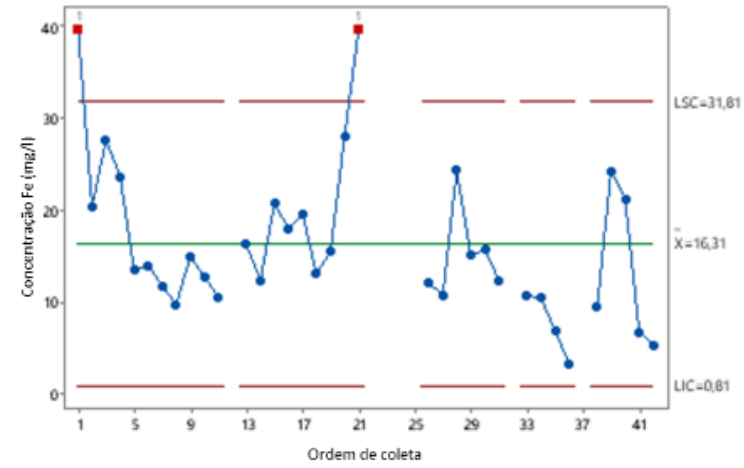
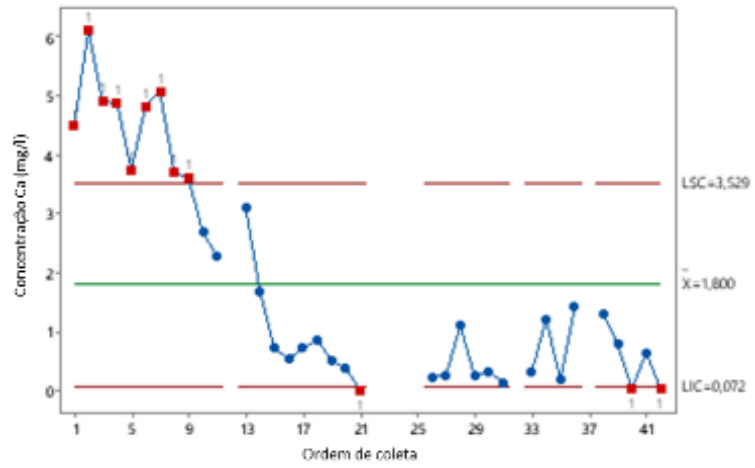


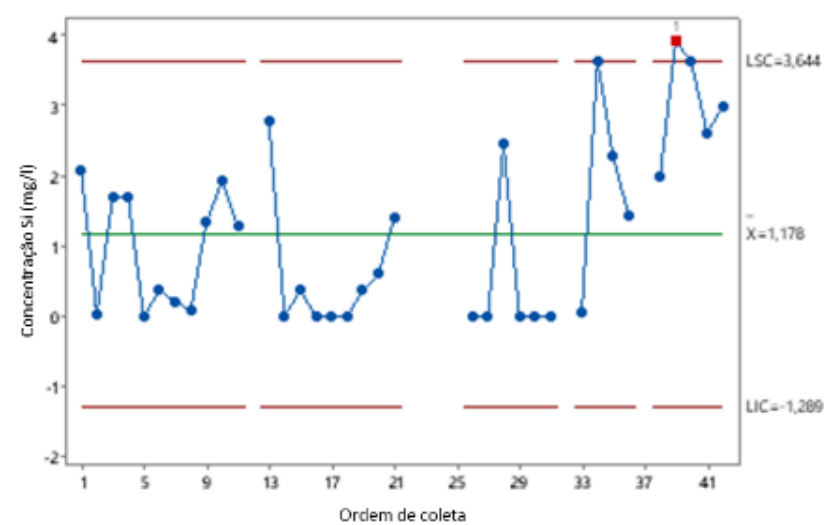
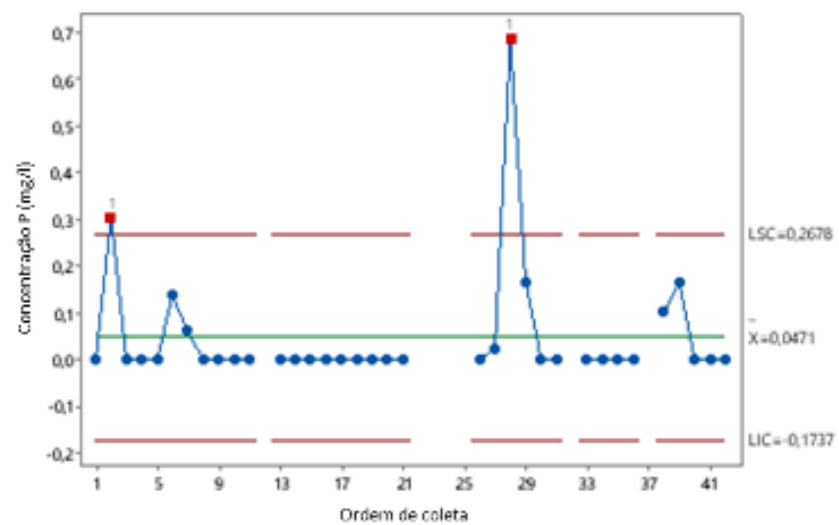
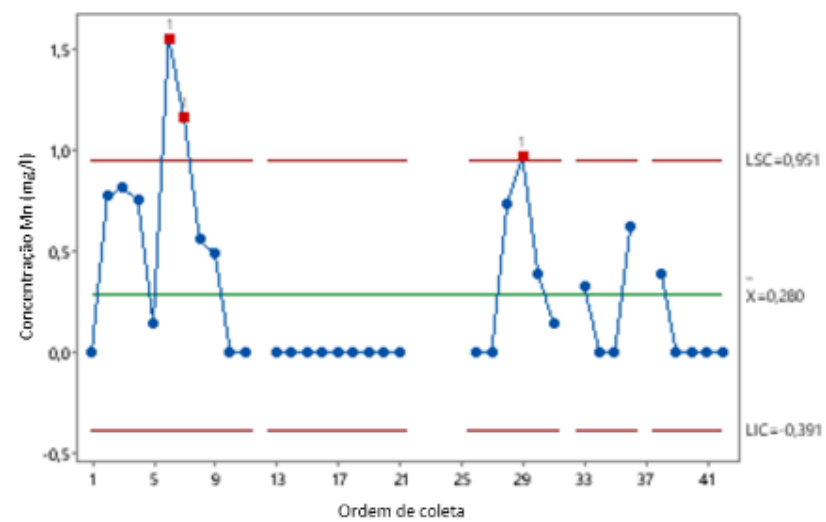
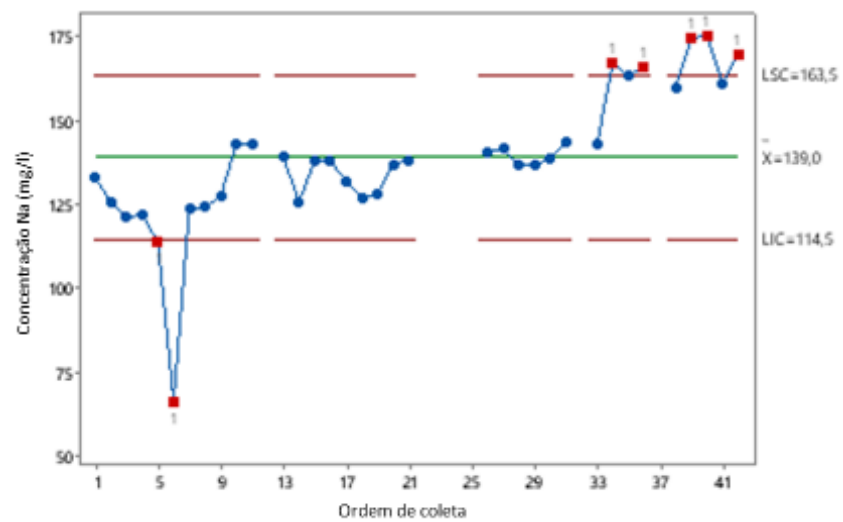


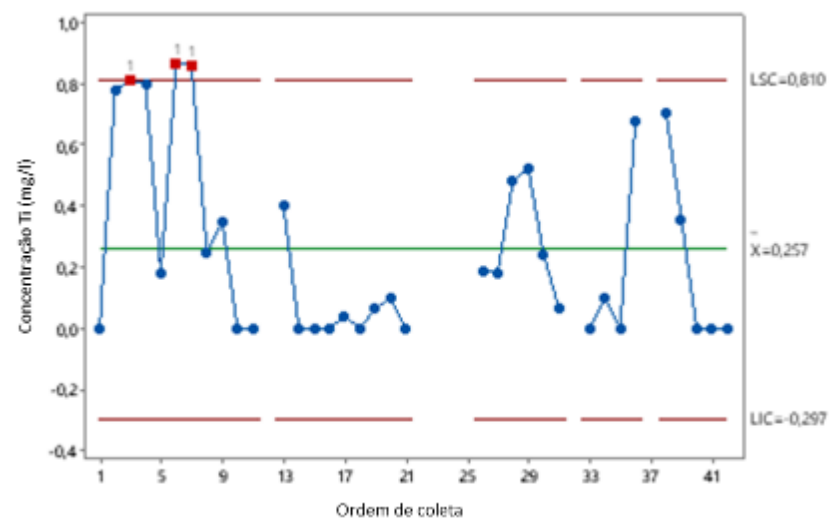
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Figura 09 - Variabilidade das concentrações de diversos elementos (Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si e Ti), nas diversas coletas da água da barragem.





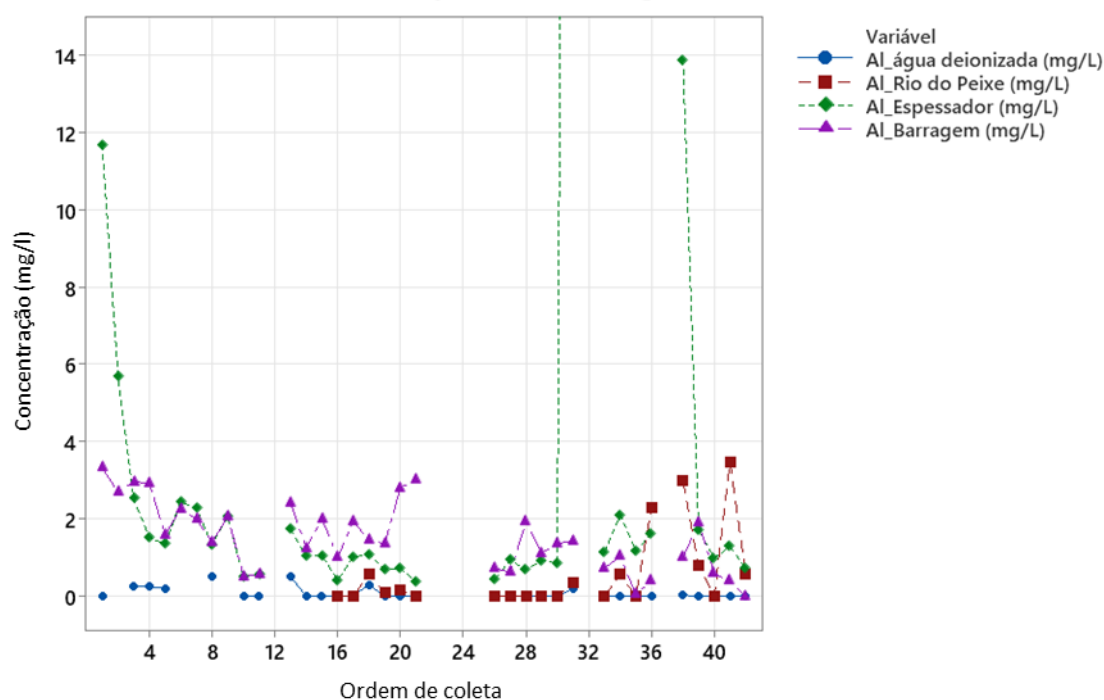




Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

A variabilidade das concentrações de Al das diferentes águas pode ser verificada na Figura 10.

Figura 10– Variação das concentrações de alumínio nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Verifica-se que água deionizada e a água do Rio do Peixe apresentam concentrações de Al mais baixas do que as águas da barragem e do espessador, que apresentaram valores mais elevados. Em especial, a água do espessador apresentou valores muito mais altos do que o normal em determinados momentos, podendo ser explicado por desajustes operacionais como variações inesperadas da alimentação, erros de preparação de reagentes, problemas de dosagem de reagentes. A Tabela 08 a seguir compila as estatísticas básicas da concentração de Al nas águas.

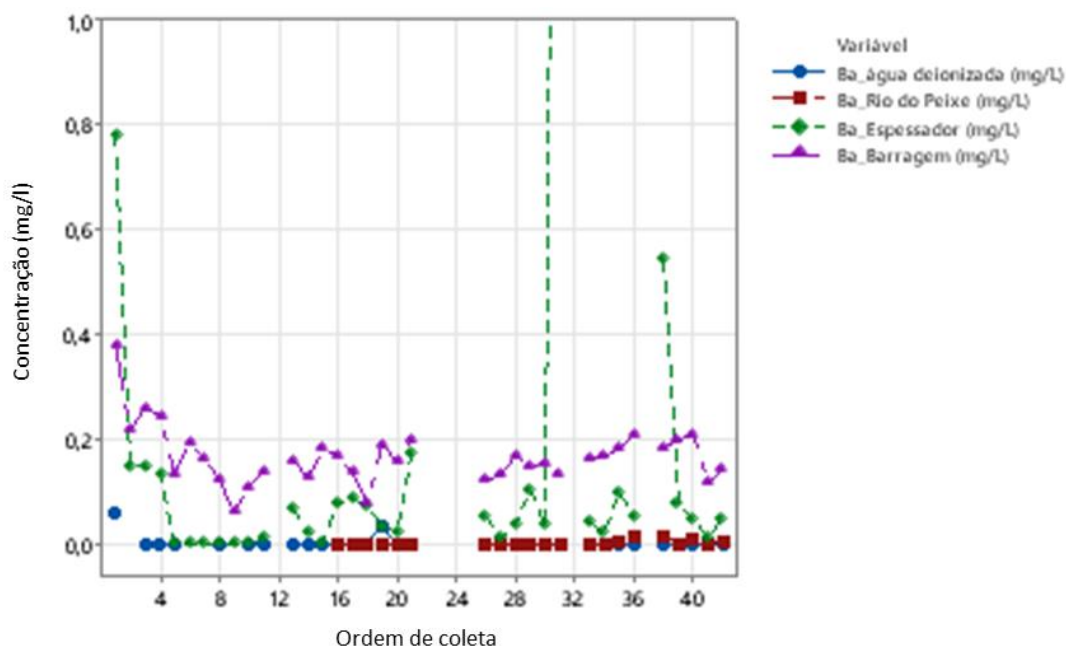
Tabela 08 – Estatísticas do Al nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|---------------------------|----|--------|---------|-------------------|
| Al_água deionizada (mg/L) | 31 | 0,0743 | 0,1482 | (-2,7087; 2,8573) |
| Al_Rio do Peixe (mg/L) | 21 | 0,568 | 1,033 | (-2,813; 3,949) |
| Al_Espessador (mg/L) | 35 | 4,42 | 14,53 | (1,81; 7,04) |
| Al_Barragem (mg/L) | 35 | 1,511 | 0,910 | (-1,109; 4,130) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade das concentrações de Ba das diferentes águas pode ser verificada na Figura 11.

Figura 11 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Ba nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Pode-se observar que as água dos espessadores e da barragem normalmente apresentam concentrações de Ba maior que as águas deionizadas e do Rio do Peixe. A Tabela 09 a seguir compila as estatísticas básicas da concentração de Ba nas águas.

Tabela 09 – Estatísticas do Ba nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|---------------------------|----|----------|----------|-----------------------|
| Ba_água deionizada (mg/L) | 31 | 0,00300 | 0,01212 | (-0,10624; 0,11224) |
| Ba_Rio do Peixe (mg/L) | 21 | 0,001738 | 0,003939 | (-0,130990; 0,134467) |
| Ba_Espessador (mg/L) | 35 | 0,1791 | 0,5693 | (0,0763; 0,2819) |
| Ba_Barragem (mg/L) | 35 | 0,16599 | 0,05629 | (0,06317; 0,26880) |

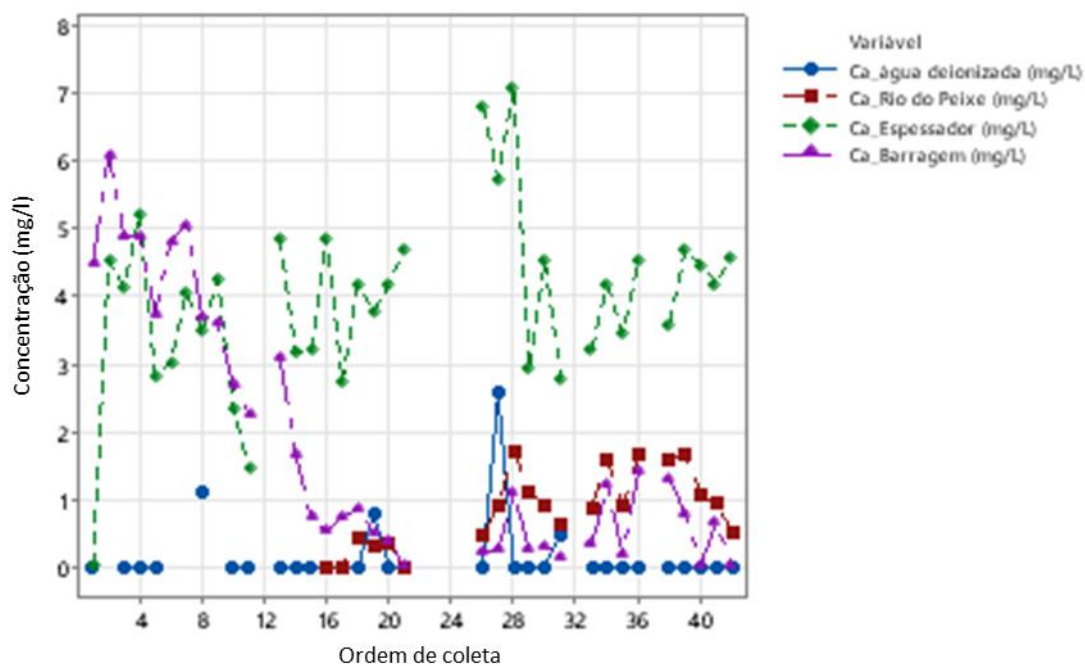
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Similar ao observado para o alumínio, por mais que no gráfico de série temporal se observem comportamentos distintos da água deionizada e da água do rio do peixe em comparação com a água do espessador e da barragem, estatisticamente essas águas são

iguais. Caso o universo de dados fosse maior, com este mesmo comportamento, esses dois grupos poderiam ser estatisticamente diferentes.

A variabilidade das concentrações de Ca das diferentes águas pode ser verificada na Figura 12.

Figura 12 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Ca nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Percebe-se que no início do gráfico as concentrações de Ca na água da barragem baixaram de 6 mg/L para estabilizar-se em torno de 1 mg/L. Vemos a água do espessador com concentrações mais altas, uma vez que é adicionado cal no espessador de concentrado para ajuste da reologia da polpa do concentrado. A 10 a seguir compila as estatísticas básicas da concentração de Ca nas águas.

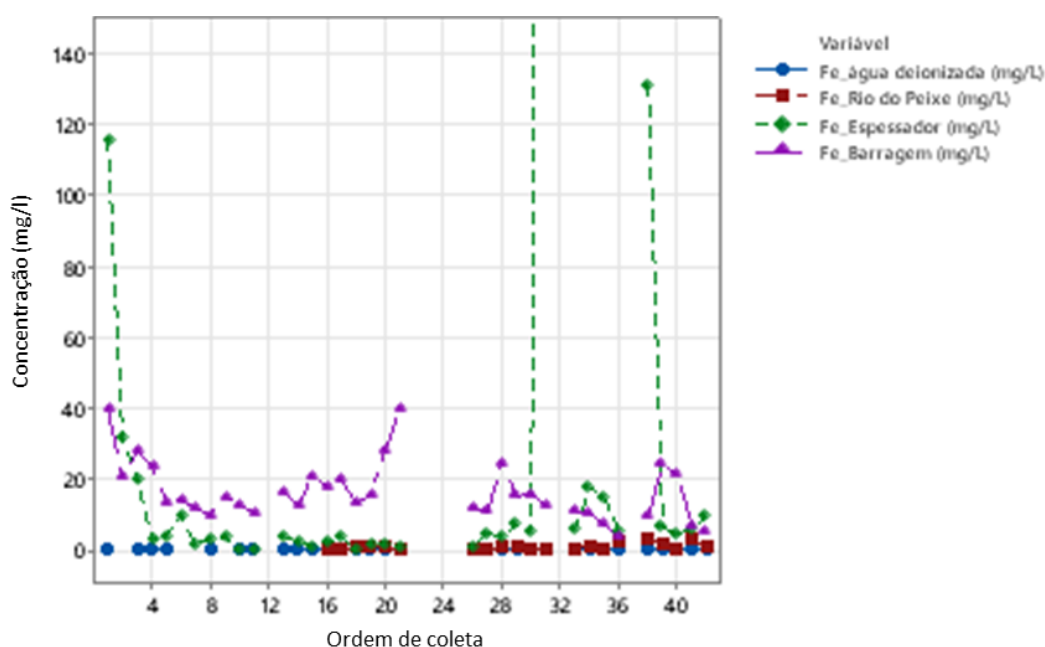
Tabela10 – Estatísticas do Ca nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|---------------------------|----|--------|---------|-------------------|
| Ca_água deionizada (mg/L) | 31 | 0,1600 | 0,5132 | (-0,2940; 0,6141) |
| Ca_Rio do Peixe (mg/L) | 21 | 0,842 | 0,570 | (0,290; 1,393) |
| Ca_Espessador (mg/L) | 35 | 3,940 | 1,338 | (3,512; 4,367) |
| Ca_Barragem (mg/L) | 35 | 1,800 | 1,856 | (1,373; 2,228) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade das concentrações de Fe das diferentes águas pode ser verificada na Figura 13.

Figura 13 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Fe nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Avaliando o gráfico de séries temporais percebe-se que a concentração de Fe na água da barragem se descola das demais com maiores valores. A tabela 11 a seguir compila as estatísticas básicas da concentração de Fe nas águas.

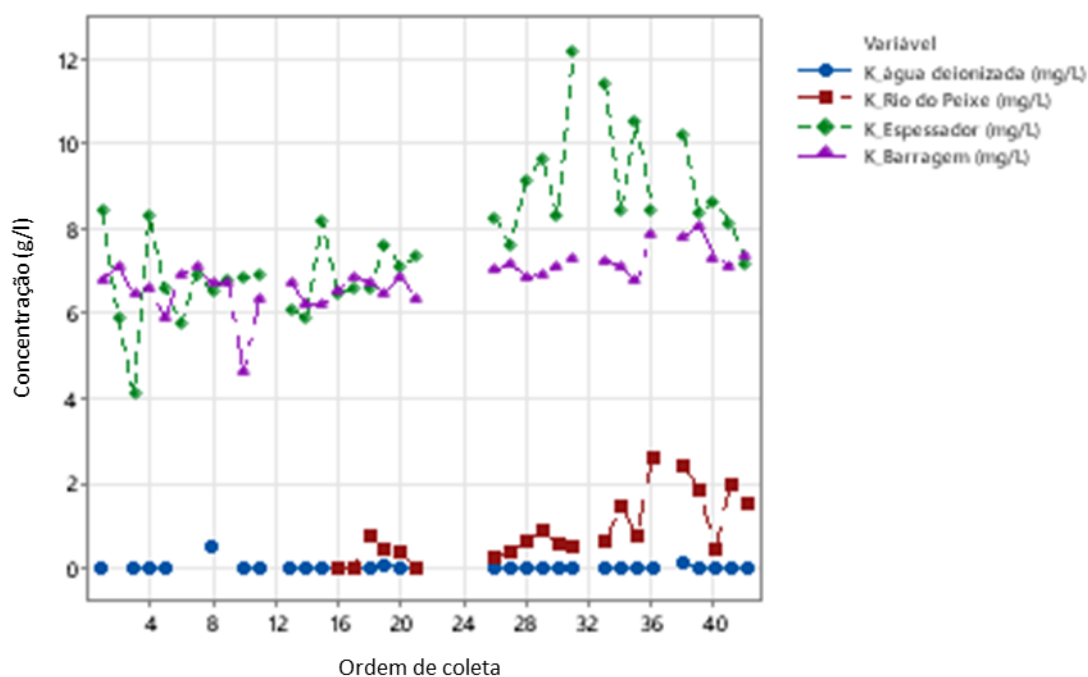
Tabela11 – Estatísticas do Fe nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|---------------------------|----|---------|---------|-----------------------|
| Fe_água deionizada (mg/L) | 31 | 0,01224 | 0,05347 | (-24,76487; 24,78936) |
| Fe_Rio do Peixe (mg/L) | 21 | 0,858 | 0,878 | (-29,246; 30,961) |
| Fe_Espessador (mg/L) | 35 | 34,0 | 129,5 | (10,7; 57,3) |
| Fe_Barragem (mg/L) | 35 | 16,31 | 8,45 | (-7,00; 39,63) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade das concentrações de K das diferentes águas pode ser verificada na Figura 14.

Figura 14 – Gráfico de séries temporais das concentrações de K nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Percebe-se pelo gráfico de séries temporais as concentrações de K nas águas de espessador e água da barragem se destacam com valores maiores que os da água deionizada e água do Rio do Peixe. A Tabela 12 a seguir compila as estatísticas básicas da concentração de K nas águas.

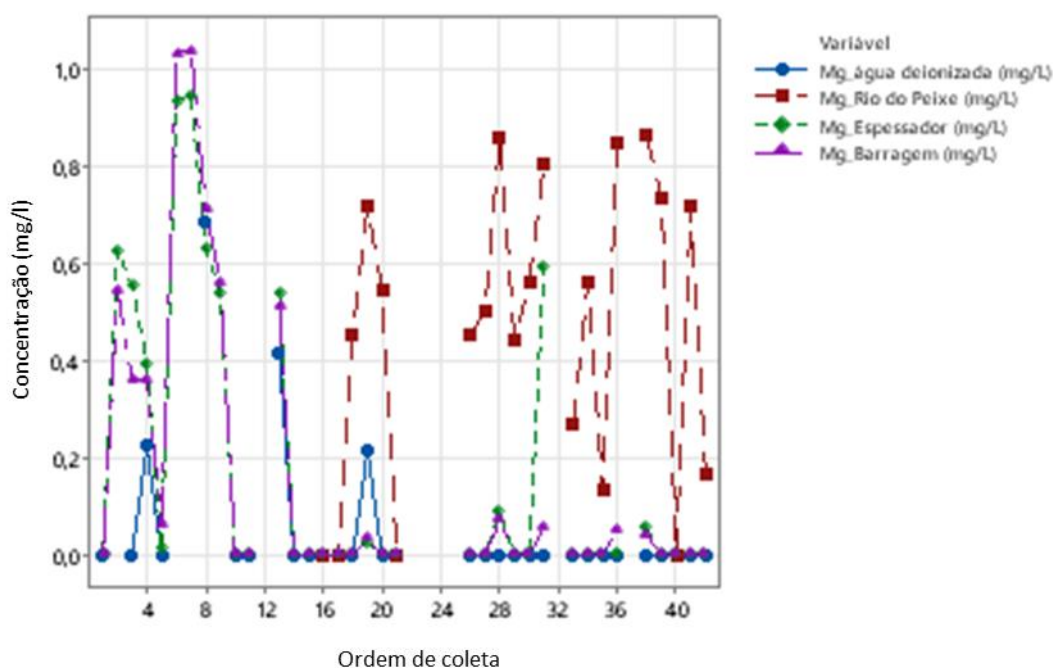
Tabela 12 – Estatísticas do K nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|--------------------------|----|--------|---------|-------------------|
| K_água deionizada (mg/L) | 31 | 0,0214 | 0,0894 | (-0,3380; 0,3808) |
| K_Rio do Peixe (mg/L) | 21 | 0,878 | 0,781 | (0,441; 1,315) |
| K_Espessador (mg/L) | 35 | 7,765 | 1,676 | (7,426; 8,103) |
| K_Barragem (mg/L) | 35 | 6,843 | 0,608 | (6,504; 7,181) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade das concentrações de Mg das diferentes águas pode ser verificada na Figura 15.

Figura 15 – Gráfico de séries das concentrações de Mg nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Avaliando o gráfico de séries temporais percebemos que as concentrações de Mg menores que 1 mg/L. A Tabela 13 a seguir compila as estatísticas básicas da concentração de Mg nas diferentes águas estudadas.

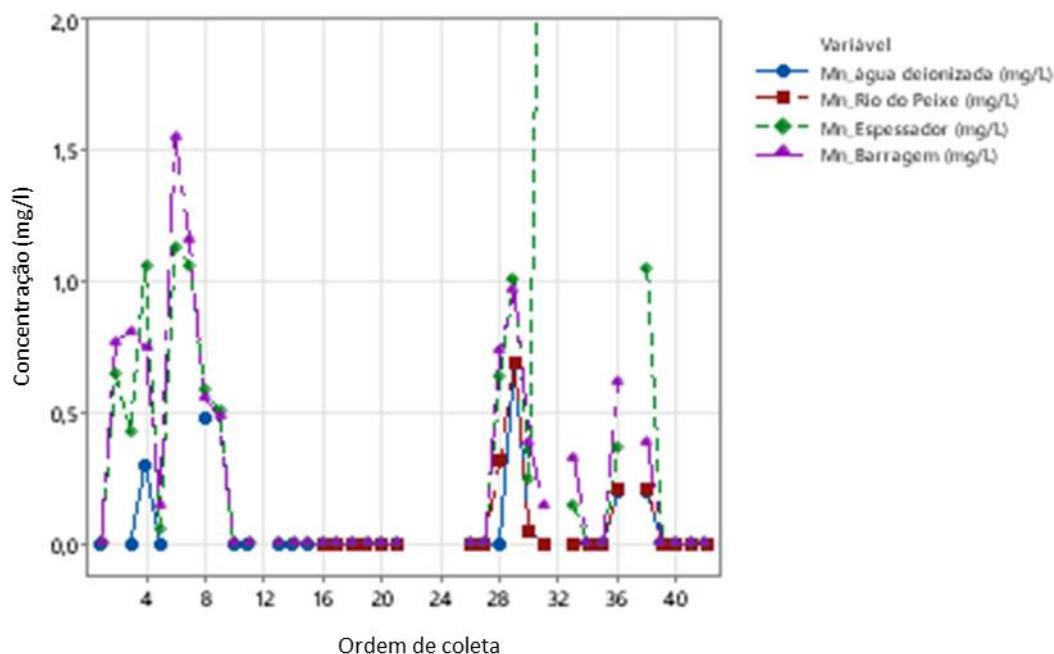
Tabela 13 – Estatísticas do Mg nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|---------------------------|----|--------|---------|-------------------|
| Mg_água deionizada (mg/L) | 31 | 0,0497 | 0,1487 | (-0,0458; 0,1452) |
| Mg_Rio do Peixe (mg/L) | 21 | 0,4586 | 0,3087 | (0,3426; 0,5747) |
| Mg_Espessador (mg/L) | 35 | 0,1702 | 0,2956 | (0,0803; 0,2601) |
| Mg_Barragem (mg/L) | 35 | 0,1559 | 0,2956 | (0,0660; 0,2458) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade das concentrações de Mn das diferentes águas pode ser verificada na Figura 16.

Figura 16 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Mn nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

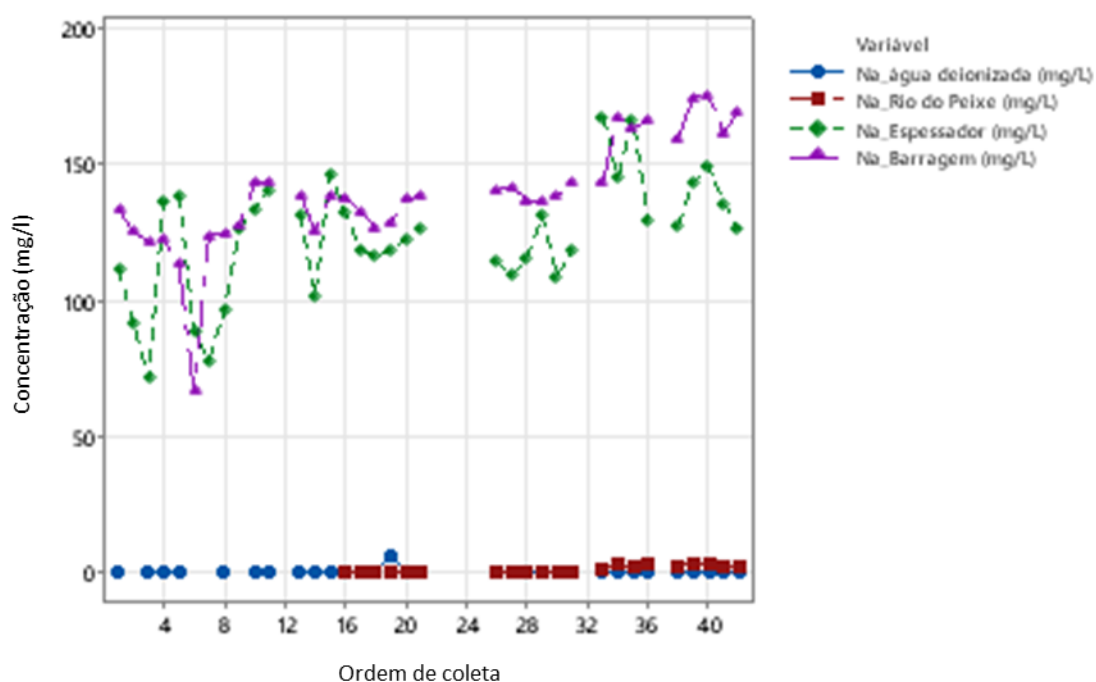
A Tabela 14 a seguir compila as estatísticas básicas da concentração de Mn nas águas. A variabilidade das concentrações de Na das diferentes águas podem ser verificadas na Figura 17. Parecido com o comportamento do K percebe-se pelo gráfico de séries temporais as concentrações de Na nas águas de espessador e água da barragem se destacam com valores maiores que os da água deionizada e água do Rio do Peixe. A Tabela 15 a seguir compila as estatísticas básicas da concentração de Na nas águas.

Tabela 14 – Estatísticas do Mn nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|---------------------------|----|--------|---------|-------------------|
| Mn_água deionizada (mg/L) | 31 | 0,0615 | 0,1588 | (-0,1002; 0,2231) |
| Mn_Rio do Peixe (mg/L) | 21 | 0,0696 | 0,1679 | (-0,1268; 0,2660) |
| Mn_Espessador (mg/L) | 35 | 0,364 | 0,715 | (0,212; 0,516) |
| Mn_Barragem (mg/L) | 35 | 0,2799 | 0,4088 | (0,1278; 0,4320) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 17 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Na nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 15 – Estatísticas do Na nas diferentes águas estudadas.

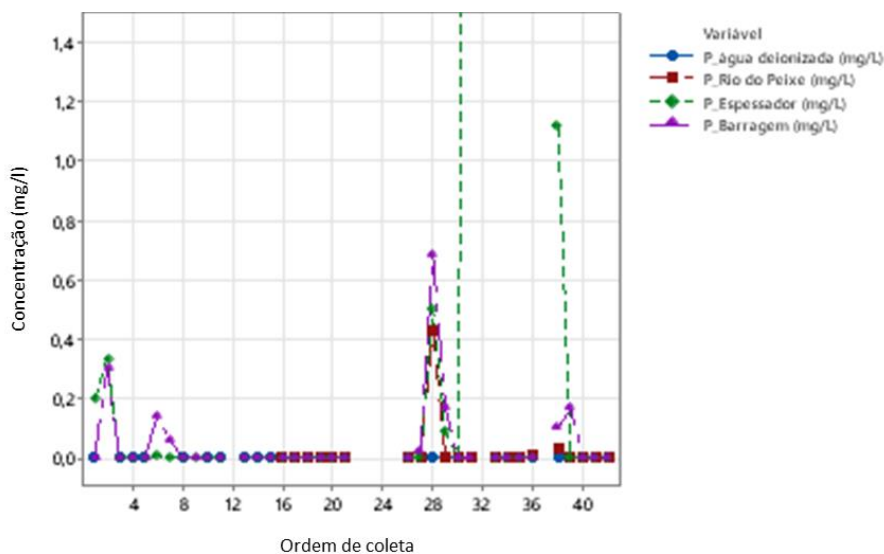
| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|---------------------------|----|--------|---------|------------------|
| Na_água deionizada (mg/L) | 31 | 0,193 | 1,076 | (-5,550; 5,937) |
| Na_Rio do Peixe (mg/L) | 21 | 0,937 | 1,160 | (-6,042; 7,915) |
| Na_Espessador (mg/L) | 35 | 123,25 | 21,82 | (117,84; 128,65) |
| Na_Barragem (mg/L) | 35 | 139,01 | 20,67 | (133,61; 144,42) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade das concentrações de P e Si das diferentes águas podem ser verificadas nas Figuras 18 e 19, respectivamente. Observam-se diferenças significativas quanto a concentração de P para todas as águas. Pelo gráfico de séries temporais verifica-se que as concentrações de Si são muito parecidas para todas as águas. As Tabelas 16 e 17

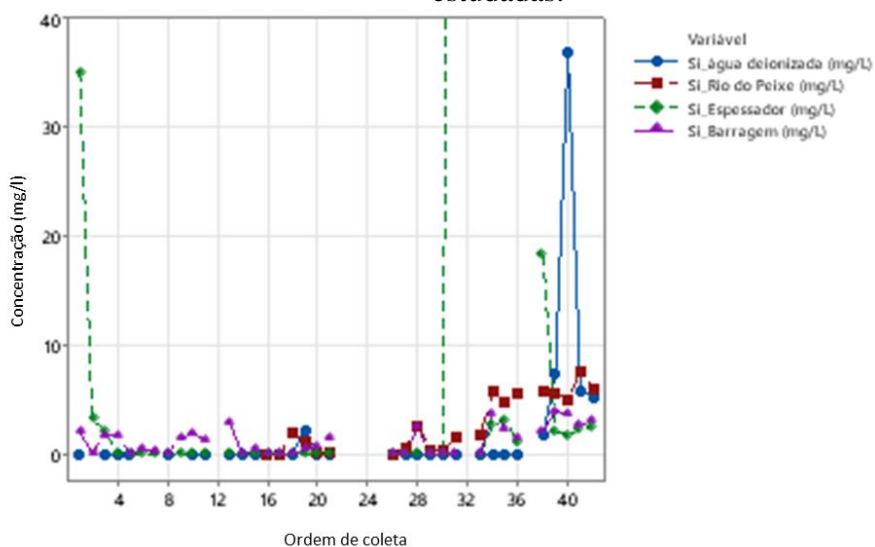
compilam as estatísticas básicas da concentração de P e Si nas águas. Avariabilidade das concentrações de Ti das diferentes águas pode ser verificada na Figura 20. Similar ao comportamento do Si, o Ti não mostra diferença independente da água. A Tabela 18 compila as estatísticas básicas da concentração de Ti nas águas.

Figura 18 – Gráfico de séries temporais das concentrações de P nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 19 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Si nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 16 – Estatísticas do P nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|--------------------------|----|----------|----------|-----------------------|
| P_água deionizada (mg/L) | 31 | 0,000000 | 0,000000 | (-0,166839; 0,166839) |
| P_Rio do Peixe (mg/L) | 21 | 0,0226 | 0,0938 | (-0,1801; 0,2253) |
| P_Espessador (mg/L) | 35 | 0,207 | 0,861 | (0,050; 0,364) |
| P_Barragem (mg/L) | 35 | 0,0471 | 0,1302 | (-0,1099; 0,2041) |

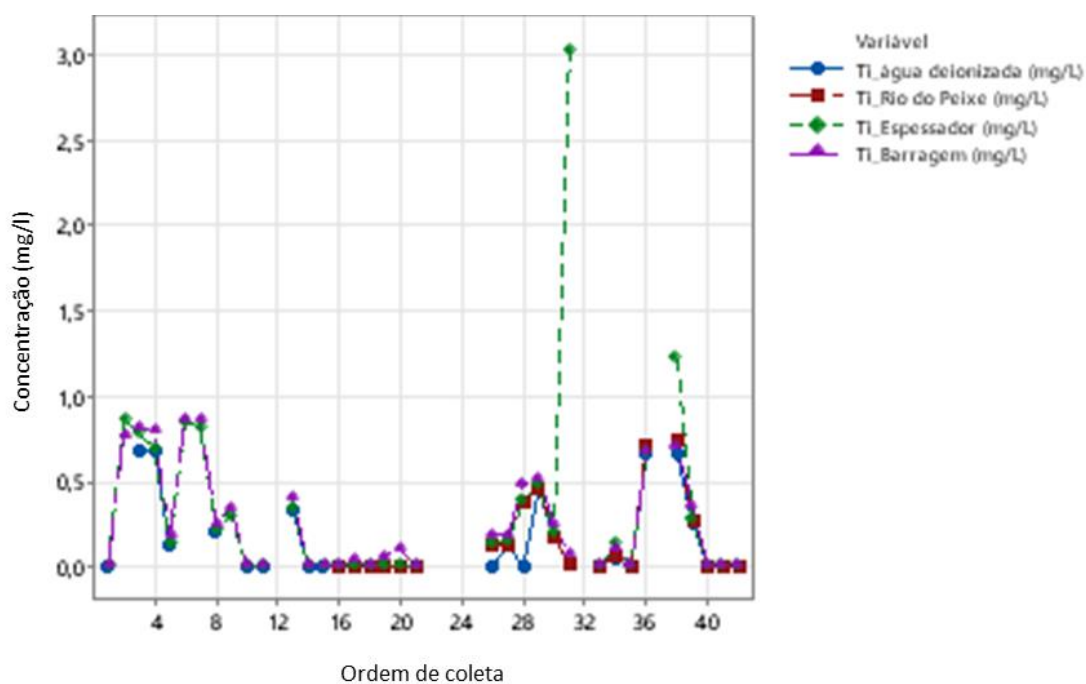
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 17 – Estatísticas do Si nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|---------------------------|----|-------|---------|-----------------|
| Si_água deionizada (mg/L) | 31 | 1,91 | 6,76 | (-3,30; 7,11) |
| Si_Rio do Peixe (mg/L) | 21 | 2,665 | 2,603 | (-3,660; 8,991) |
| Si_Espessador (mg/L) | 35 | 6,50 | 26,41 | (1,60; 11,40) |
| Si_Barragem (mg/L) | 35 | 1,178 | 1,260 | (-3,722; 6,077) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 20 – Gráfico de séries temporais das concentrações de Ti nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

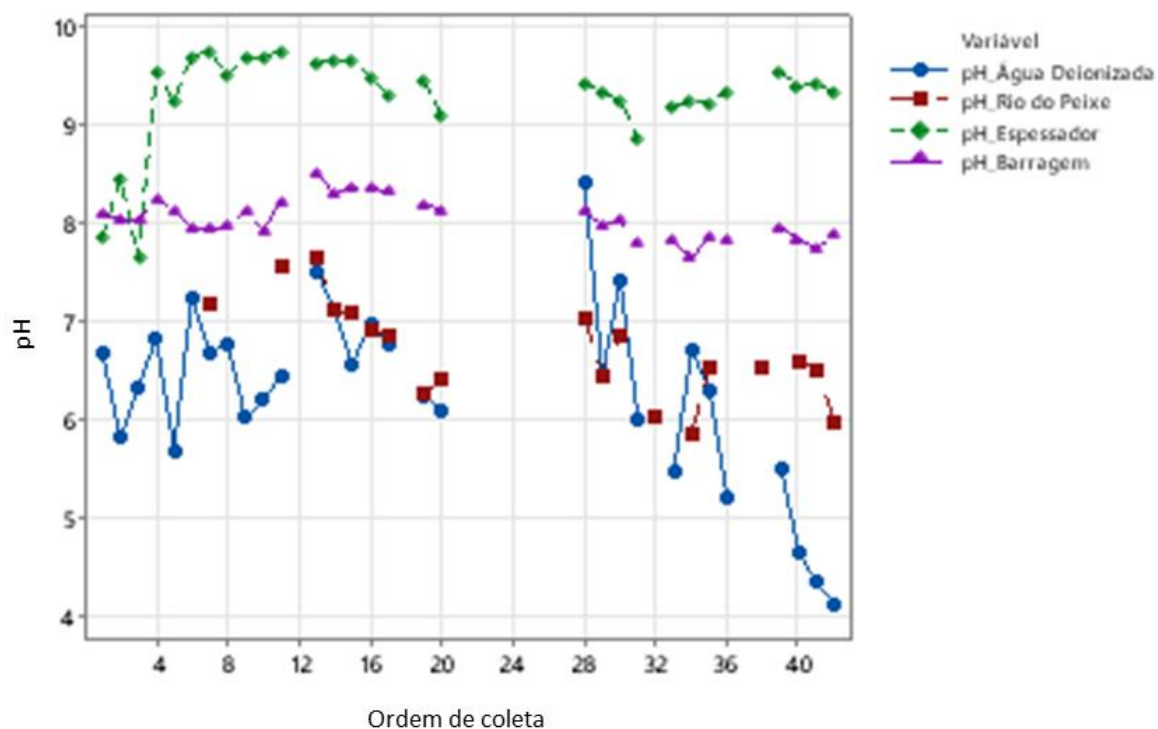
Tabela 18 – Estatísticas do Ti nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|---------------------------|----|--------|---------|-------------------|
| Ti_água deionizada (mg/L) | 31 | 0,1416 | 0,2356 | (0,0051; 0,2781) |
| Ti_Rio do Peixe (mg/L) | 21 | 0,1464 | 0,2352 | (-0,0194; 0,3122) |
| Ti_Espessador (mg/L) | 35 | 0,3340 | 0,5795 | (0,2056; 0,4625) |
| Ti_Barragem (mg/L) | 35 | 0,2569 | 0,3060 | (0,1285; 0,3853) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade do pH das diferentes águas podem ser verificadas na Figura 21. Observa-se que a água do espessador possui um pH maior que as demais, apresentando-se entre 9 e 10 na maioria dos dias coletados. A água da barragem também tem característica alcalina, apresentando na maioria dos dias entre 7,5 e 8,5. Já a água deionizada e a água do Rio do Peixe têm características ácidas na maioria dos dias e ambas têm comportamento parecido, com valores de pH que vão de pouco mais de 4 até 7,5 e com a água deionizada com um valor de pouco maior do que 8. A Tabela 19 compila as estatísticas básicas do pH das águas.

Figura 21 – Gráfico de séries temporais do pH nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

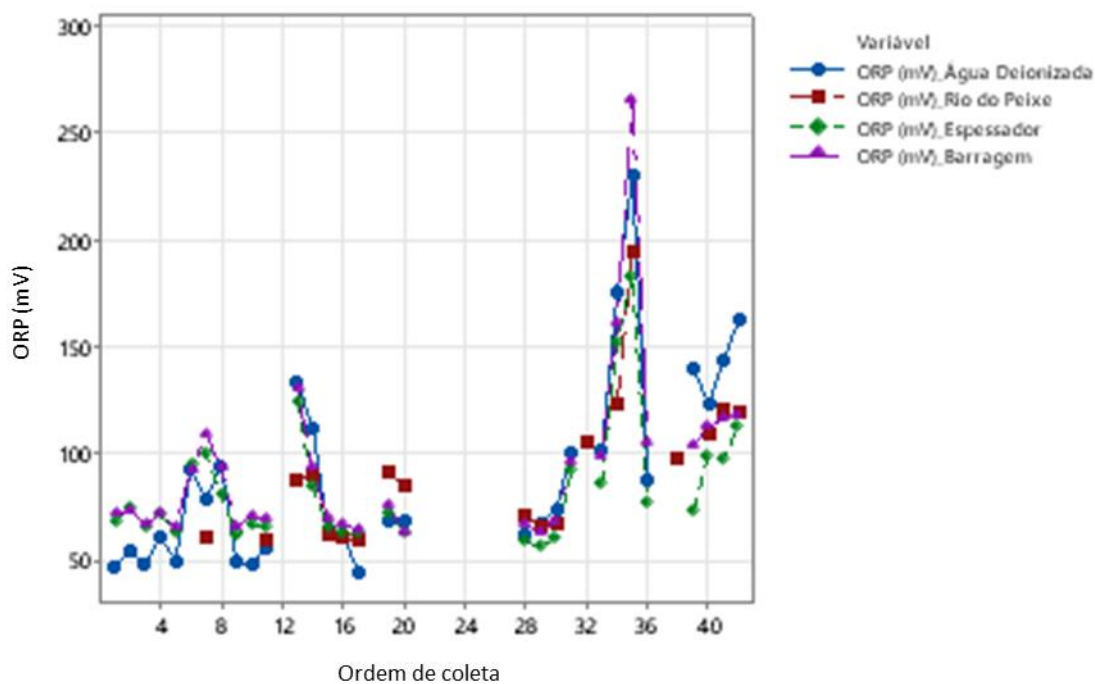
Tabela 19 – Estatísticas do pH nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|--------------------|----|-------|---------|--------------|
| pH_Água Deionizada | 30 | 6,2 | 0,9 | (6,05; 6,49) |
| pH_Rio do Peixe | 19 | 6,6 | 0,5 | (6,41; 6,96) |
| pH_Espessador | 30 | 9,2 | 0,5 | (9,05; 9,48) |
| pH_Barragem | 30 | 8,0 | 0,2 | (7,81; 8,24) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade do ORP das diferentes águas pode ser verificada na Figura 22. Observando o gráfico de séries temporais do ORP percebemos que os tipos de água não diferem entre si quanto a esse parâmetro. Existem variações, mas não são ligadas a origem das águas. A Tabela 20 a seguir compila as estatísticas básicas do ORP nas águas.

Figura 22 – Gráfico de séries temporais do ORP nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

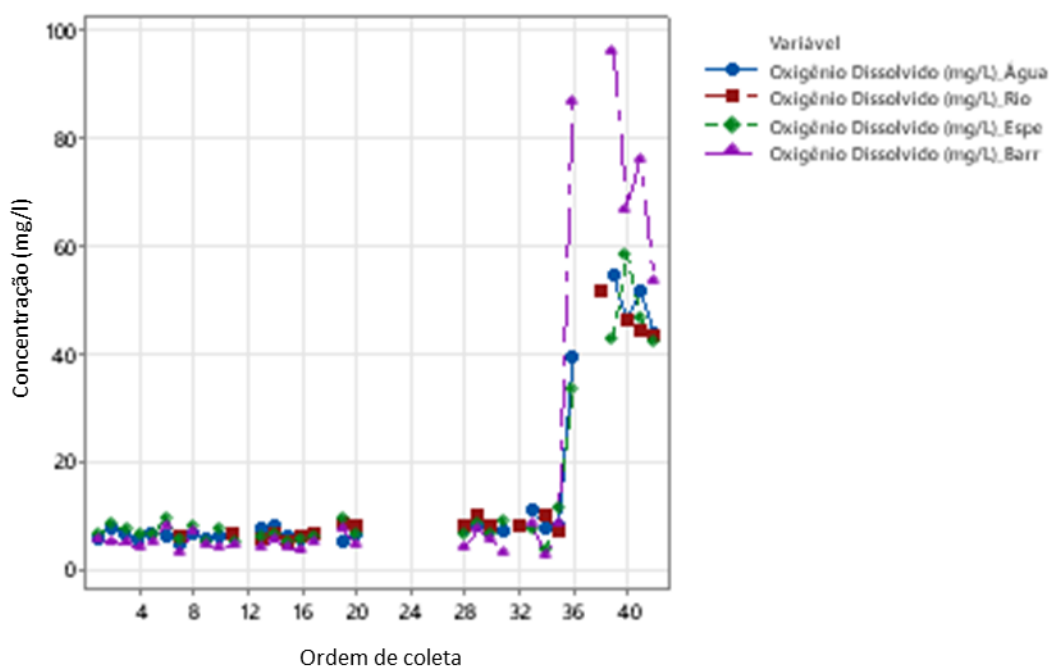
Tabela 20 – Estatísticas do ORP nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|--------------------------|----|-------|---------|-----------------|
| ORP (mV)_Água Deionizada | 30 | 89,87 | 45,23 | (76,07; 103,67) |
| ORP (mV)_Rio do Peixe | 19 | 90,83 | 33,70 | (73,49; 108,17) |
| ORP (mV)_Espessador | 30 | 82,95 | 28,98 | (69,15; 96,75) |
| ORP (mV)_Barragem | 30 | 92,68 | 40,89 | (78,88; 106,48) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade das concentrações de oxigênio dissolvido das diferentes águas pode ser verificada na Figura 23.

Figura 23 – Gráfico de séries temporais do Oxigênio dissolvido nas diferentes águas estudadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Similar ao ORP, não observamos diferenças entre os tipos de águas quanto à concentração de oxigênio dissolvido. A Tabela 21 a seguir compila as estatísticas básicas da concentração de oxigênio dissolvido nas águas.

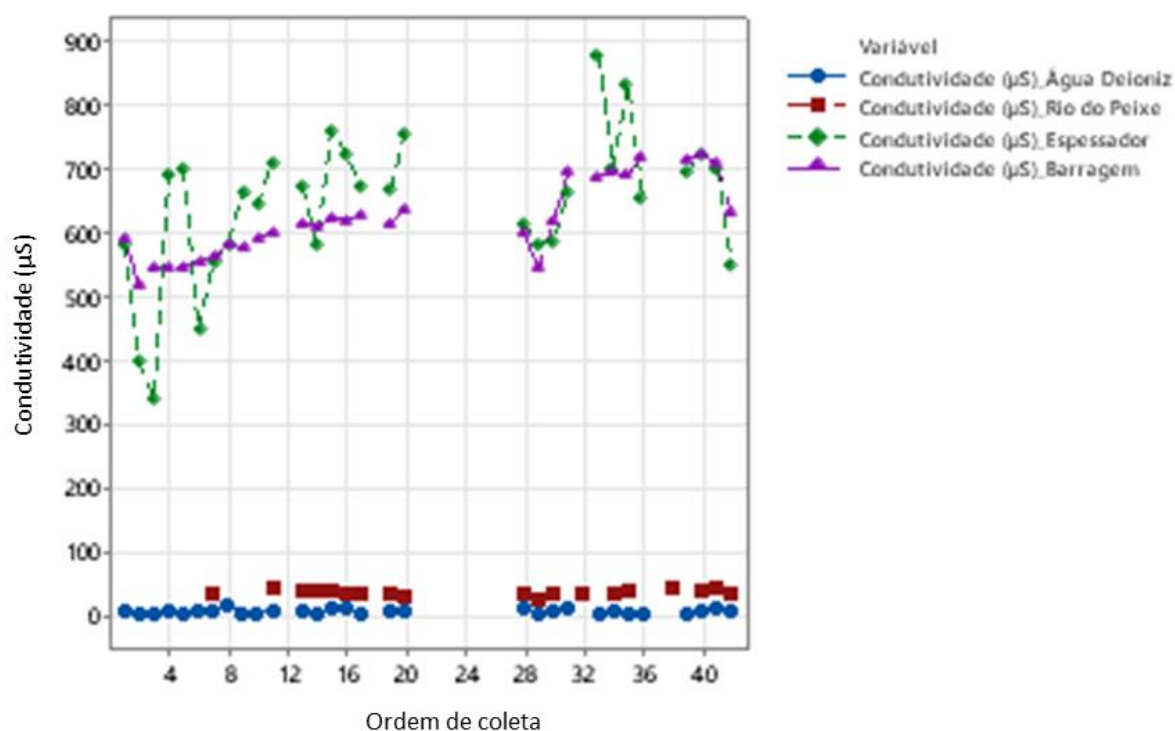
Tabela 21 – Estatísticas dos valores de oxigênio dissolvido nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|---------------------------------|----|-------|---------|---------------|
| Oxigênio Dissolvido (mg/L)_Água | 30 | 13,41 | 15,48 | (6,30; 20,52) |
| Oxigênio Dissolvido (mg/L)_Rio | 19 | 15,44 | 16,48 | (6,51; 24,38) |
| Oxigênio Dissolvido (mg/L)_Espe | 30 | 13,05 | 14,85 | (5,94; 20,16) |
| Oxigênio Dissolvido (mg/L)_Barr | 30 | 16,82 | 27,72 | (9,71; 23,93) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade da condutividade das diferentes águas pode ser verificada na Figura 24.

Figura 24 – Gráfico de séries temporais da Condutividade nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Avaliando o gráfico de séries temporais pode-se observar dois grupos bem distintos na característica de condutividade das águas. Um grupo com menor condutividade composto pela água deionizada e a água do Rio do peixe e outro com a condutividade maior com as águas do espessador e da barragem. Observa-se uma flutuação maior nos valores de condutividade da água dos espessadores.

Esse fato ocorre por essa água ser influenciada diretamente pelas variações operacionais da planta de beneficiamento, isto é, como a planta varia muito os seus parâmetros operacionais para atingir a qualidade do produto, a água do overflow dos espessadores varia de acordo com a usina. A Tabela 22 a seguir compila as estatísticas básicas da condutividade nas águas.

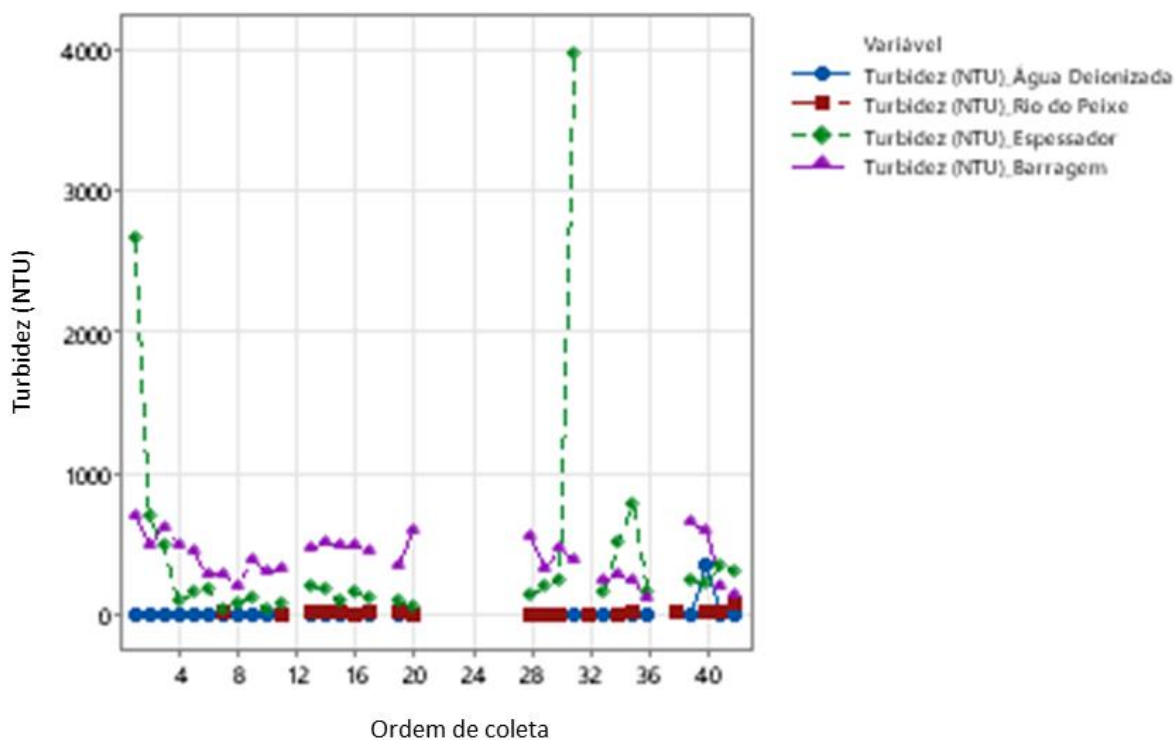
Tabela 22 – Estatísticas da condutividade nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|--|----|-------|---------|-------------------|
| Condutividade (μS)_Água Deioniz | 30 | 4,750 | 3,331 | (-19,998; 29,498) |
| Condutividade (μS)_Rio do Peixe | 19 | 34,49 | 4,55 | (3,40; 65,59) |
| Condutividade (μS)_Espessador | 30 | 644,6 | 115,1 | (619,9; 669,3) |
| Condutividade (μS)_Barragem | 30 | 619,2 | 60,4 | (594,5; 644,0) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade da turbidez das diferentes águas pode ser verificada na Figura 25.

Figura 25 – Gráfico de séries temporais da turbidez nas diferentes águas estudadas.

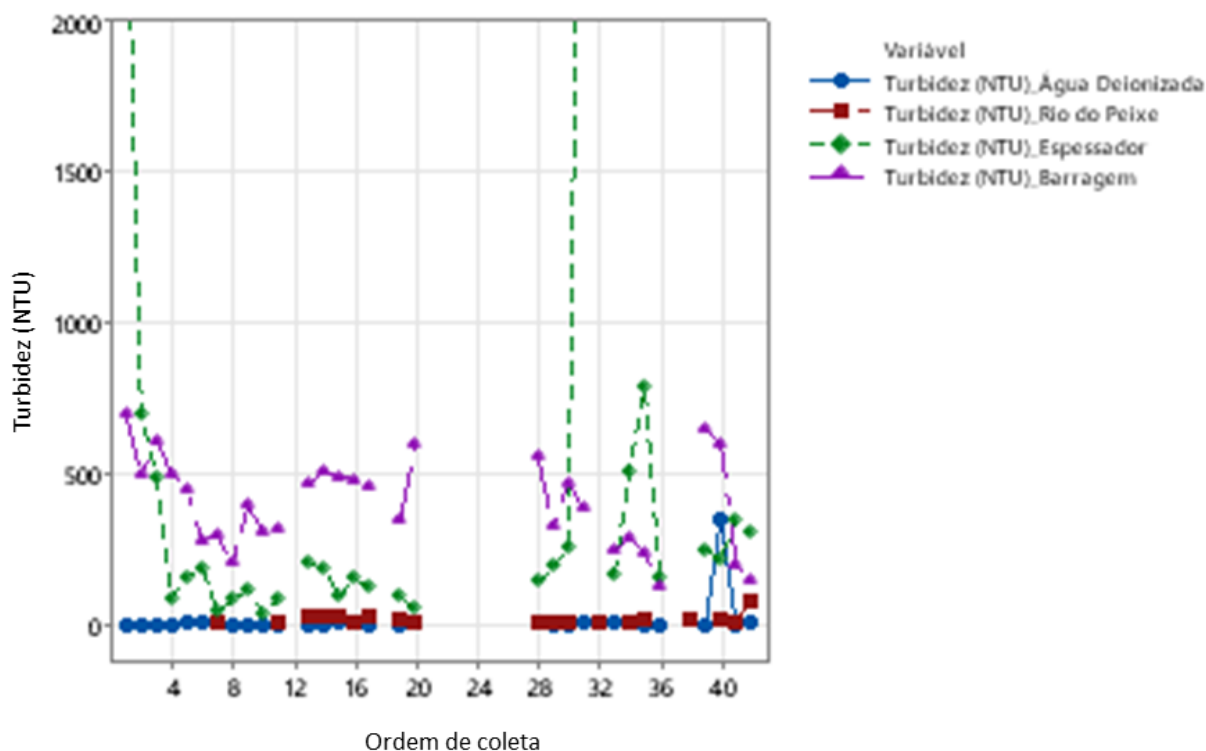


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O gráfico de séries temporais mostra primeiramente que a turbidez da água dos espessadores tem dois outliers, possivelmente causados por descontrole operacional dos espessadores. Ao mudar a escala desse gráfico para uma melhor avaliação a Figura 26, observa-se que em muitos dias a água da barragem com a maior turbidez, tendo valores até maiores que 500 NTU.

Em sequência a água dos espessadores apresenta valores médios próximos de 150 NTU desconsiderando os dois outliers. Considerando esses dados anormais valores médios de 400 NTU são obtidos. A água da barragem recebe parte do rejeito da usina de beneficiamento que não recebe tratamento nos espessadores, levando assim uma parte das lamas, tendo as partículas finas, que não sedimentam sem a adição de reagentes, a turbidez desse tipo de água é naturalmente mais alta.

Figura 26 – Turbidez nas diferentes águas estudadas com escala reduzida no eixo das ordenadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na sequência a água deionizada e a água do Rio do Peixe, apresentam valores de 12 e 16 NTU médios. A Tabela 23 a seguir compila as estatísticas básicas da turbidez das águas.

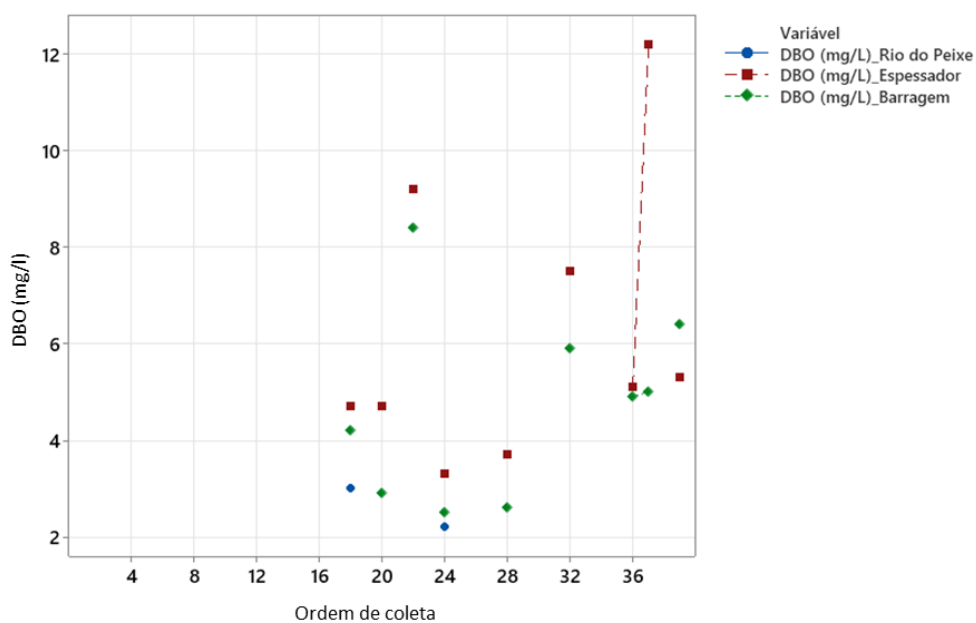
Tabela 23 – Estatísticas da variabilidade da turbidez nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|--------------------------------|----|-------|---------|-------------------|
| Turbidez (NTU)_Água Deionizada | 30 | 12,6 | 63,7 | (-148,5; 173,6) |
| Turbidez (NTU)_Rio do Peixe | 19 | 16,35 | 16,92 | (-185,99; 218,69) |
| Turbidez (NTU)_Espessador | 30 | 427 | 830 | (266; 588) |
| Turbidez (NTU)_Barragem | 30 | 401,8 | 155,1 | (240,8; 562,8) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade da DBO das diferentes águas pode ser verificada na Figura 27. Avaliando o gráfico de séries temporais percebe-se que, apesar de poucos dados, a água do Rio do Peixe possui menores valores de demanda bioquímica de oxigênio. A Tabela 24 a seguir compila as estatísticas básicas da DBO nas águas. A variabilidade da demanda química de oxigênio das diferentes águas pode ser verificada na Figura 28.

Figura 27 – Demanda bioquímica de oxigênio nas diferentes águas estudadas.



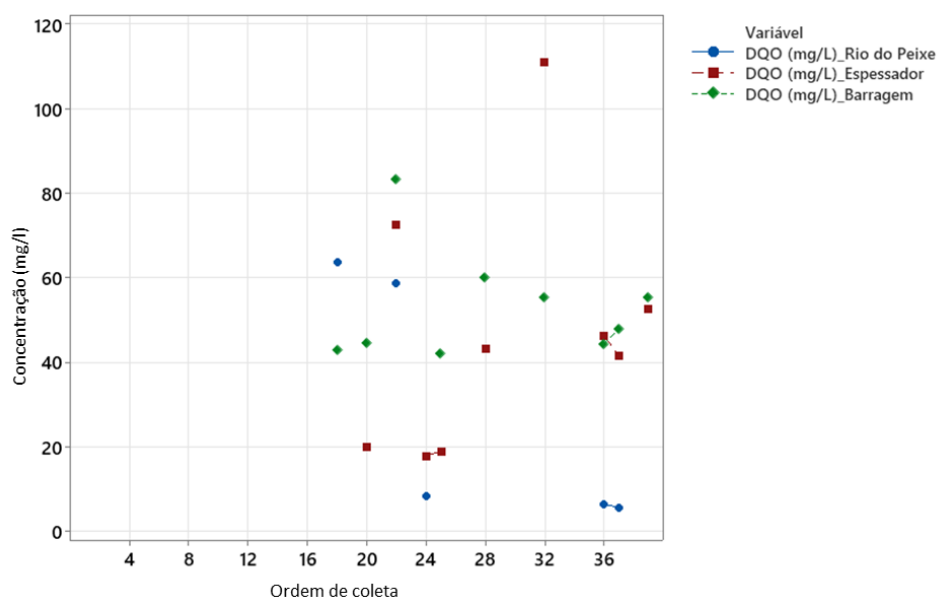
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 24 – Variabilidade da demanda bioquímica de oxigênio nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|-------------------------|---|-------|---------|-----------------|
| DBO (mg/L)_Rio do Peixe | 2 | 2,600 | 0,566 | (-1,001; 6,201) |
| DBO (mg/L)_Espessador | 9 | 6,189 | 2,913 | (4,491; 7,886) |
| DBO (mg/L)_Barragem | 9 | 4,756 | 1,964 | (3,058; 6,453) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 28 – Gráfico das séries temporais da demanda química de oxigênio nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Avaliando o gráfico de séries temporais verifica-se que a água do Rio do Peixe tem um comportamento de menor demanda química de oxigênio. A Tabela 25 a seguir compila as estatísticas básicas da DQO nas águas.

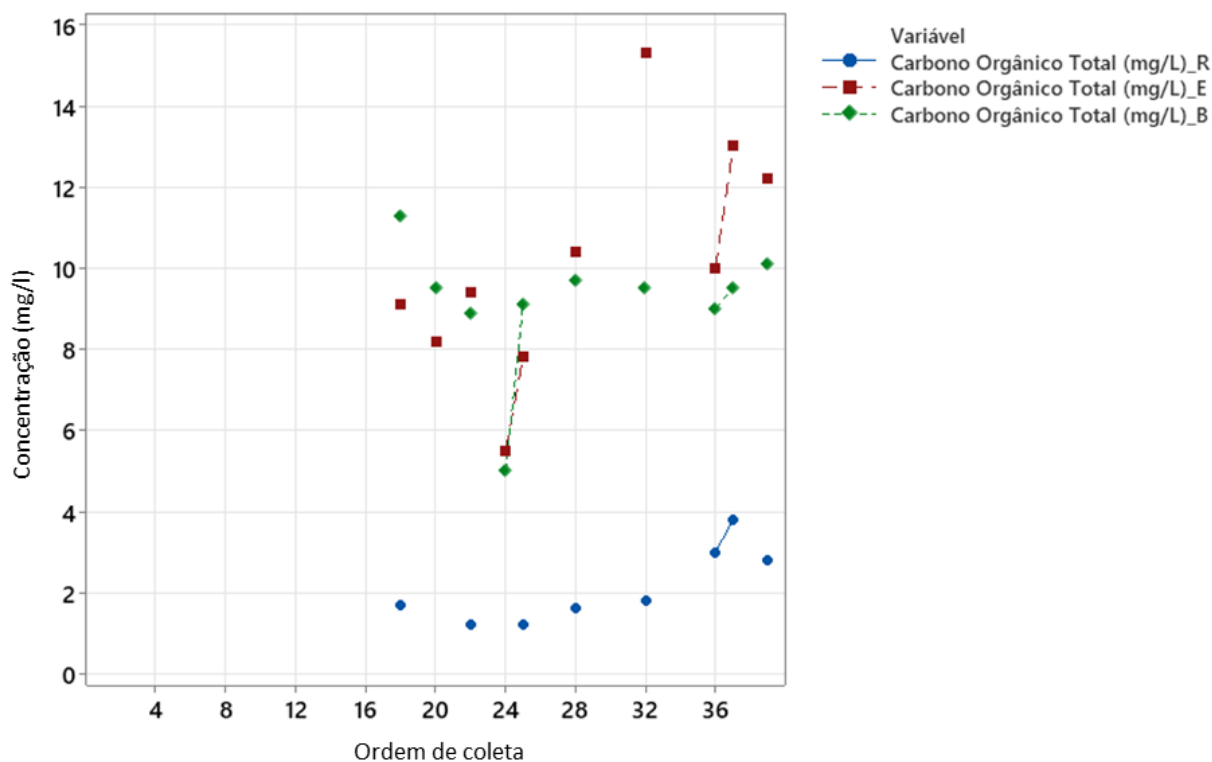
Tabela 25 – Estatísticas da demanda química de oxigênio nas diferentes águas estudadas.

| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|-------------------------|---|-------|---------|----------------|
| DQO (mg/L)_Rio do Peixe | 5 | 28,5 | 29,8 | (5,5; 51,4) |
| DQO (mg/L)_Espessador | 9 | 47,04 | 29,97 | (29,93; 64,15) |
| DQO (mg/L)_Barragem | 9 | 52,82 | 13,08 | (35,71; 69,93) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A variabilidade das concentrações de carbono orgânico total das diferentes águas pode ser verificada na Figura 29.

Figura 29 – Carbono orgânico total nas diferentes águas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O gráfico de séries temporais mostra que temos o comportamento da água do Rio do Peixe com carbono orgânico total menor que as demais e a água do espessador com uma maior dispersão dentre as demais. A Tabela 26 a seguir compila as estatísticas básicas da concentração de carbono orgânico total nas águas.

Tabela 26 – Estatísticas de carbono orgânico total nas diferentes águas estudadas.

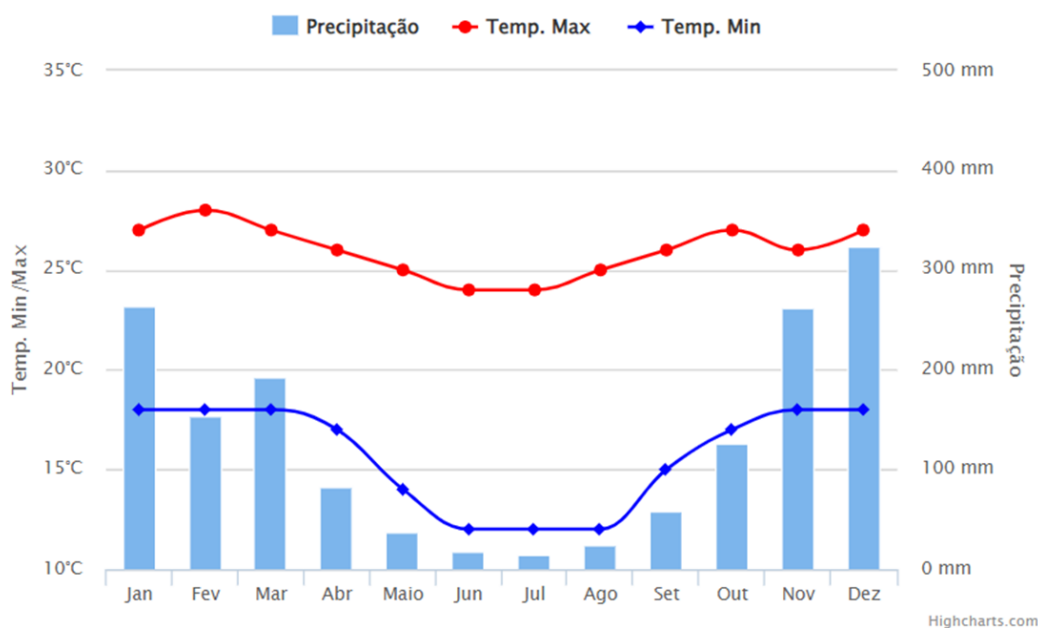
| Fator | N | Média | DesvPad | IC de 95% |
|---------------------------------|----|--------|---------|-----------------|
| Carbono Orgânico Total (mg/L)_R | 8 | 2,138 | 0,949 | (0,672; 3,603) |
| Carbono Orgânico Total (mg/L)_E | 10 | 10,090 | 2,819 | (8,779; 11,401) |
| Carbono Orgânico Total (mg/L)_B | 10 | 9,160 | 1,616 | (7,849; 10,471) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Observa-se que a sazonalidade afeta as concentrações de Al, Ca, Fe, K, Mn, Na, Si, Ti e carbono orgânico total nas águas. Em período chuvoso, de novembro a março, observa-

se uma tendência de maiores concentrações de elementos dissolvidos nas águas, exceto para o Fe, onde observa-se o aumento desse elemento nos períodos mais secos do ano. O carbono orgânico total também mostra um comportamento similar ao alumínio. Uma explicação para esse comportamento de sazonalidade é a época de chuvas da região, conforme a Figura 30, que mostra a ocorrência de chuvas na região da captação do Rio do Peixe.

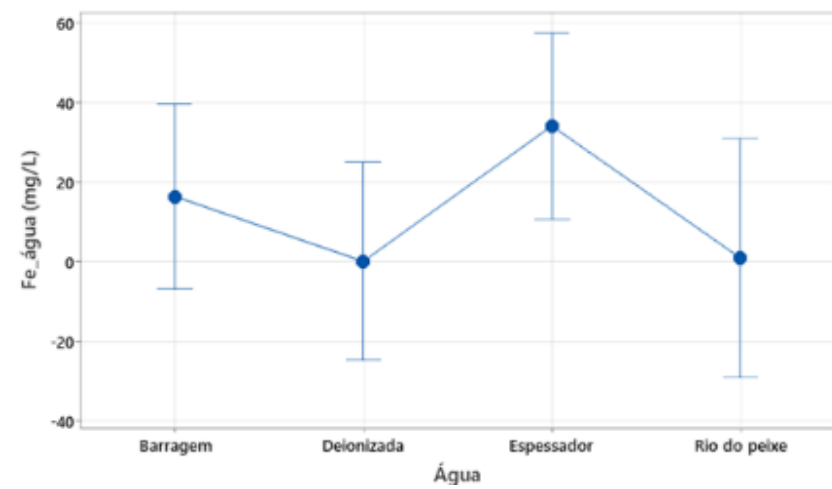
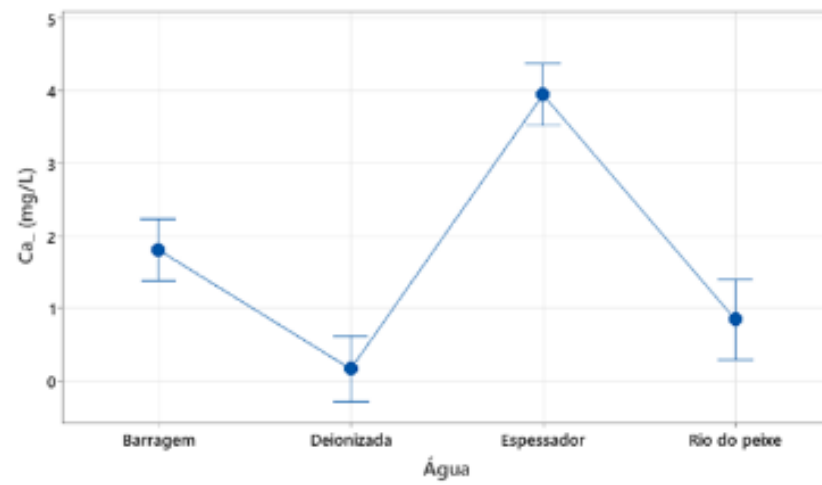
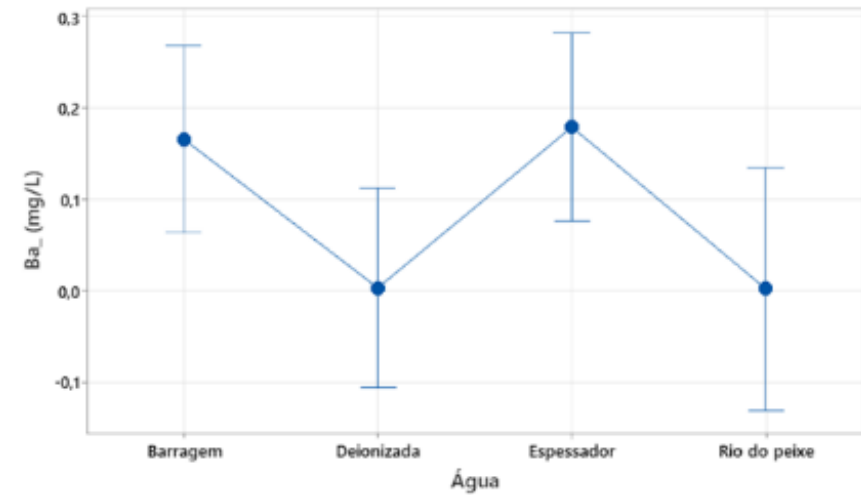
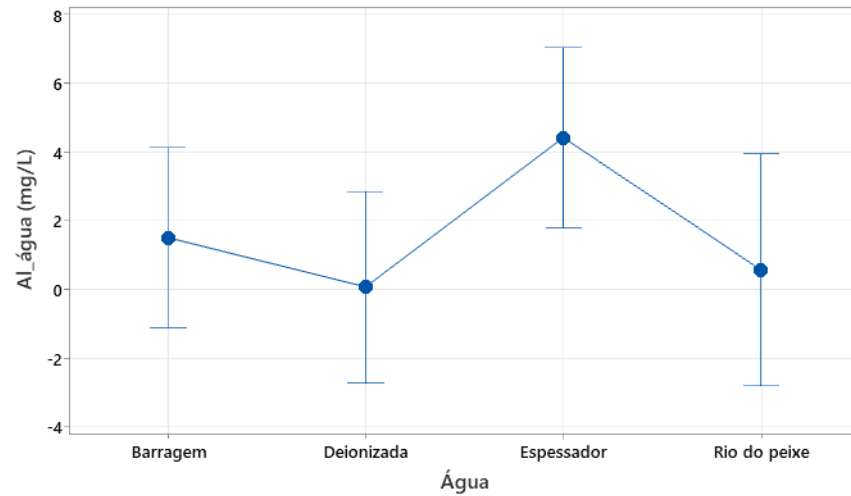
Figura 30 – Pluviometria no município de Conceição do Mato Dentro em 2023

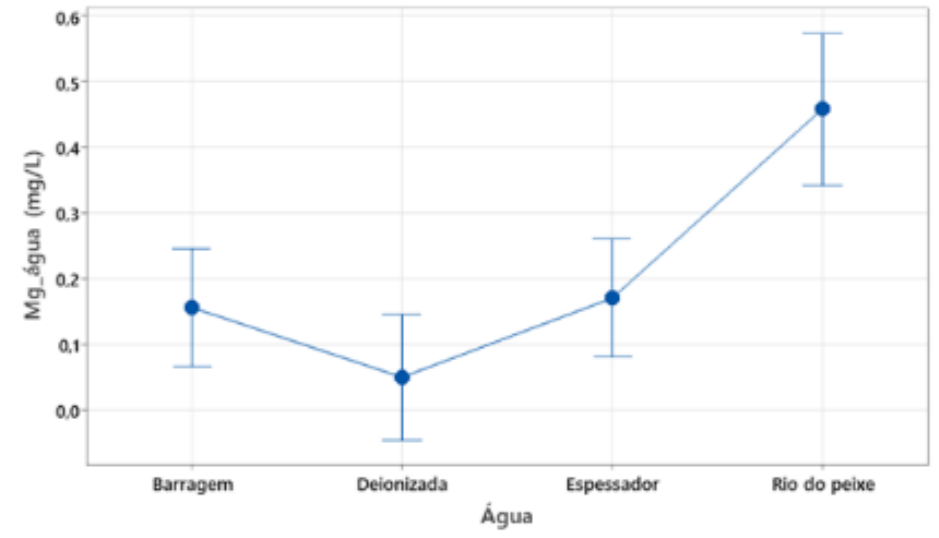
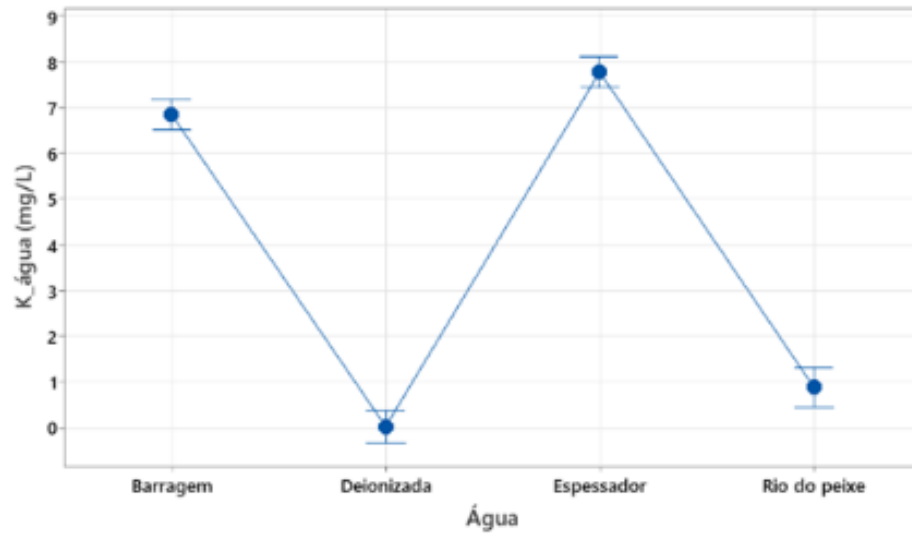


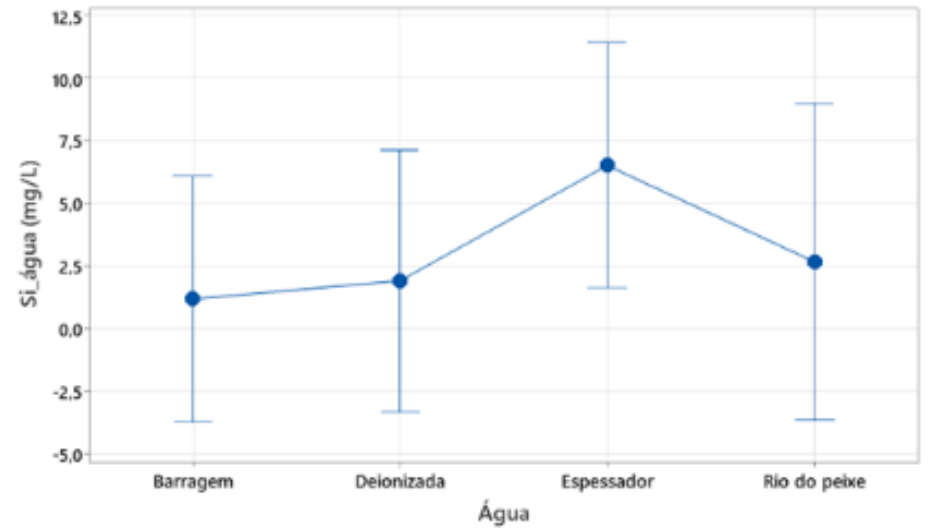
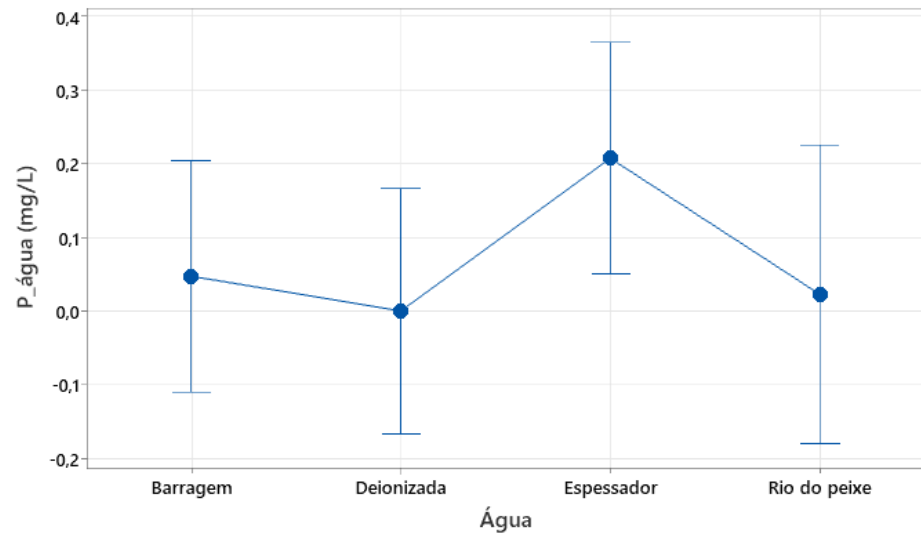
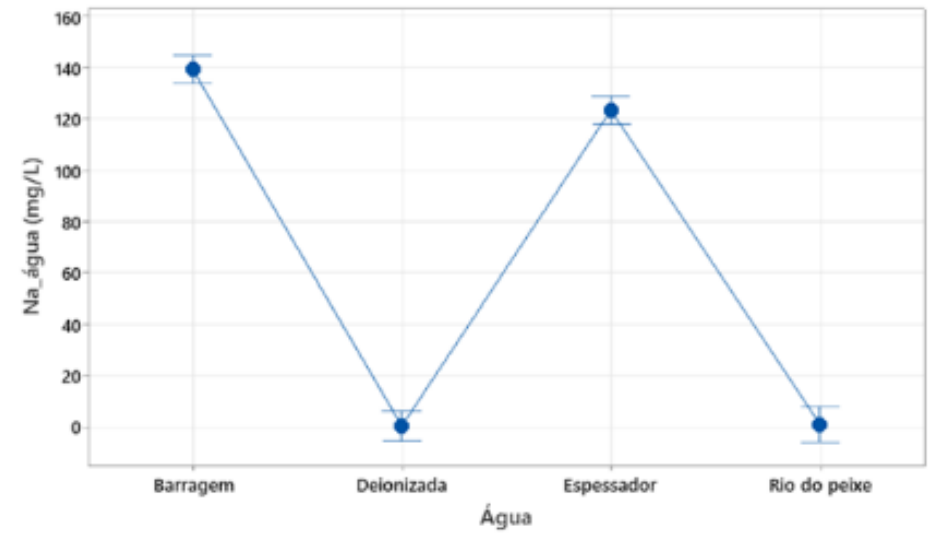
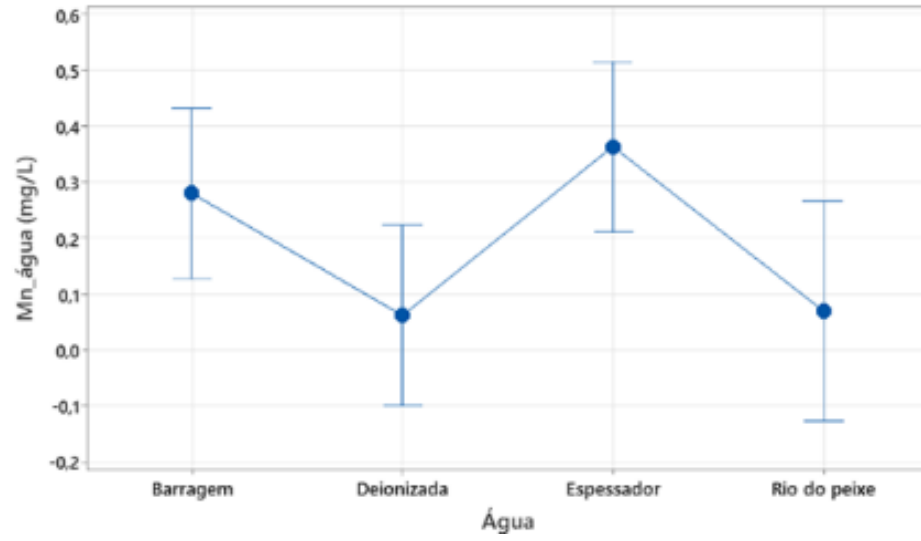
Fonte: Portal Clima Tempo

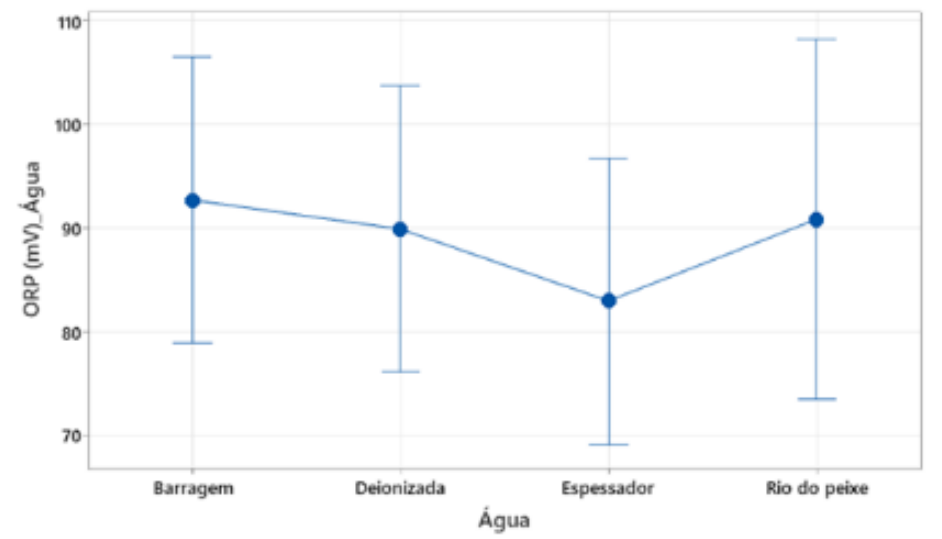
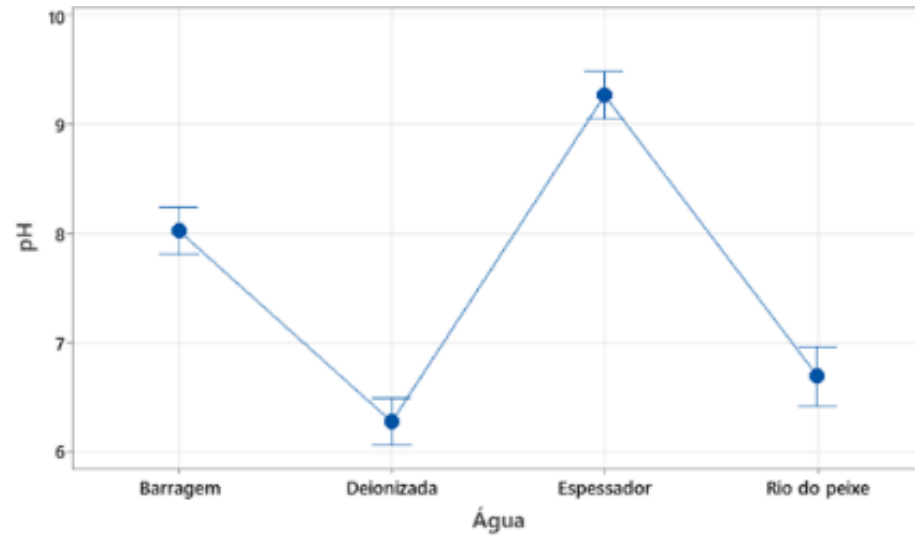
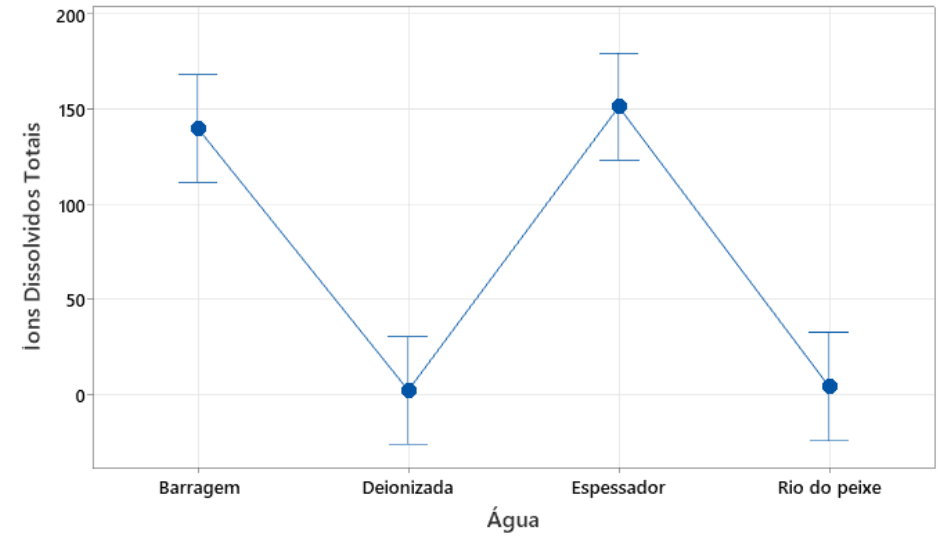
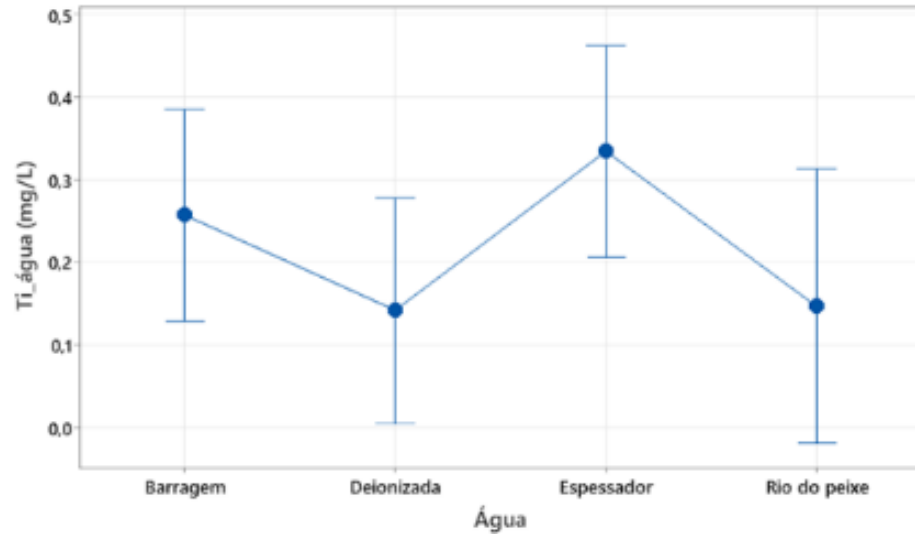
Os valores de concentrações de íons dissolvidos das águas estudadas podem ser que agrupados em dois subgrupos, um composto pelas águas deionizadas e do rio do peixe que possuem menores de concentrações de íons dissolvidos, menores condutividades e menores turbidez e outro grupo composto pelas águas da barragem e do overflow dos espessadores, que possuem valores maiores de concentração de íons dissolvidos, maiores condutividades e maiores turbidez (Figura 31). Um resumo dos valores numéricos das características das diferentes águas é apresentado na Tabela 27. Esses valores são as médias e os desvios padrões dessas médias.

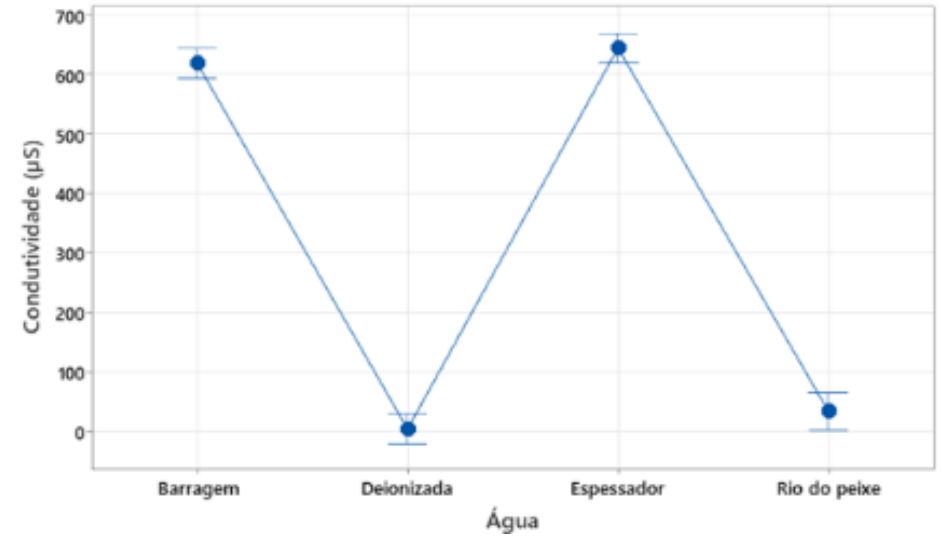
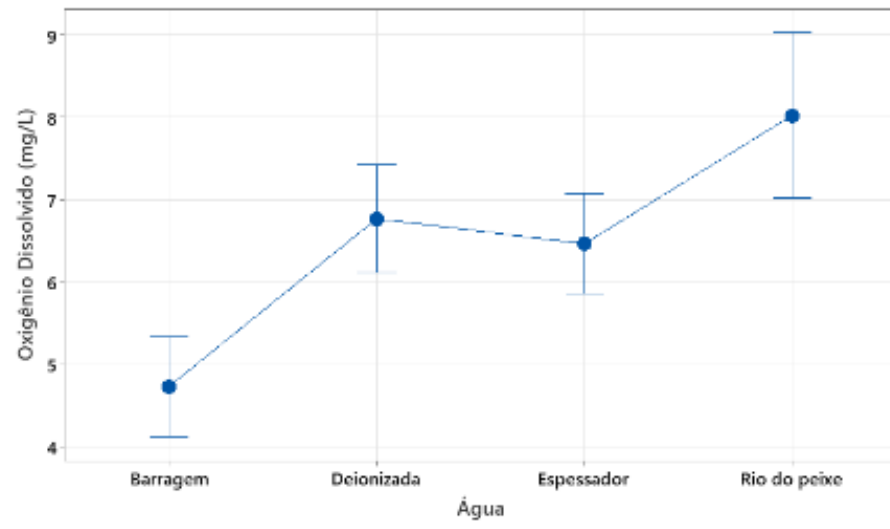
Figura 31 – Análise ANOVA das concentrações de diversos elementos (Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si e Ti), e características das diversas águas estudadas.

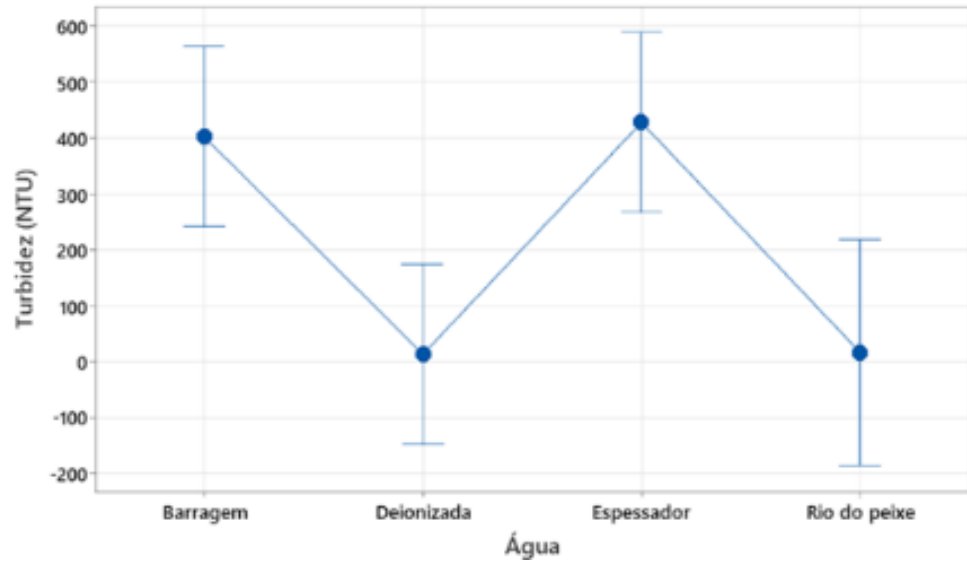












Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 27 - Resumo das características das águas estudadas

| Parâmetros químicos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|----------|--------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|----------|--------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| Água | Nº | Al (mg/L) | Desv. Pad. Al | Ba (mg/L) | Desv. Pad. Ba | Ca (mg/L) | Desv. Pad. Ca | Fe (mg/L) | Desv. Pad. Fe | K (mg/L) | Desv. Pad. K | Mg (mg/L) | Desv. Pad. Mg | Mn (mg/L) | Desv. Pad. Mn | Na (mg/L) | Desv. Pad. Na | P (mg/L) | Desv. Pad. P | Si (mg/L) | Desv. Pad. Si | Ti (mg/L) | Desv. Pad. Ti |
| Rio do Peixe | 21 | 0,57 | 1,03 | 0,00 | 0,00 | 0,84 | 0,57 | 0,86 | 0,88 | 0,88 | 0,78 | 0,46 | 0,31 | 0,07 | 0,17 | 0,94 | 1,16 | 0,02 | 0,09 | 2,67 | 2,60 | 0,15 | 0,24 |
| Espessador | 35 | 4,42 | 14,53 | 0,18 | 0,57 | 3,94 | 1,34 | 34,00 | 129,50 | 7,76 | 1,68 | 0,17 | 0,30 | 0,36 | 0,71 | 123,25 | 21,82 | 0,21 | 0,86 | 6,50 | 26,41 | 0,33 | 0,58 |
| Barragem | 35 | 1,51 | 0,91 | 0,17 | 0,06 | 1,80 | 1,86 | 16,31 | 8,45 | 6,84 | 0,61 | 0,16 | 0,30 | 0,28 | 0,41 | 139,01 | 20,67 | 0,05 | 0,13 | 1,18 | 1,26 | 0,26 | 0,31 |

| Parâmetros químicos | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----|----------|----------------|----------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------|----------------|---------------------|------|---------------|
| Água | Nº | ORP (mV) | Desv. Pad. ORP | Oxigênio Dissolvido (mg/L) | Desv. Pad. Ox. Dissolvido | Condutividade (µS) | Desv. Pad. Condutividade | Turbidez (NTU) | Desv. Pad. Turbidez | pH | Desv. Pad. pH |
| Rio do Peixe | 19 | 90,83 | 33,70 | 8,03 | 1,31 | 34,49 | 4,55 | 16,35 | 16,92 | 9,27 | 0,50 |
| Espessador | 30 | 82,95 | 28,98 | 6,46 | 1,42 | 644,60 | 115,11 | 427,24 | 829,52 | 8,03 | 0,21 |
| Barragem | 30 | 92,68 | 27,72 | 4,73 | 1,55 | 619,21 | 155,05 | 401,80 | 2,64 | 2,60 | 26,66 |

| Parâmetros orgânicos das águas | | | | |
|--------------------------------|----|------|-------|-------|
| Água | Nº | DBO | DQO | COT |
| Rio do Peixe | 10 | 2,60 | 28,48 | 2,14 |
| Espessador | 10 | 6,19 | 47,04 | 10,09 |
| Barragem | 10 | 4,76 | 52,82 | 9,16 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

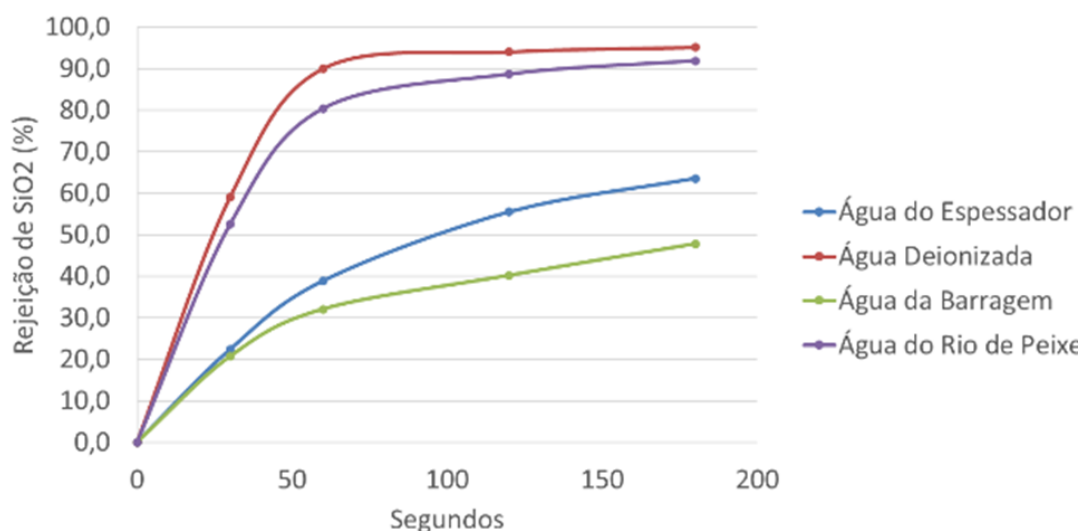
4.3. FLOTAÇÃO

4.3.1 Cinética de flotação

Para avaliar a influência das diferentes águas na cinética de flotação foram executados testes com a mesma amostra representativa de minério e as diferentes águas, nas mesmas condições de pH e dosagens de depressor e coletor. Pode-se observar na Figura 32 que utilizando a água deionizada e a água do Rio do Peixe a flotação da sílica é mais rápida do que quando as águas da barragem e do espessador foram usadas.

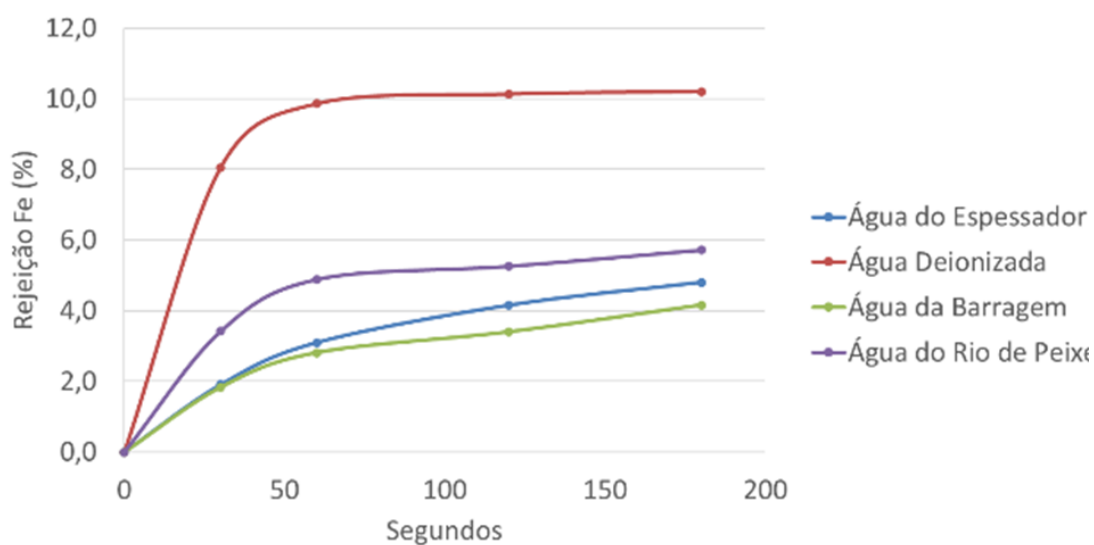
Para a rejeição de ferro (Figura 32a), observa-se um comportamento similar à rejeição de sílica, o equilíbrio ocorre após 60s e a água deionizada favoreceu maiores perdas de ferro, chegando a mais de 10%. As demais águas têm perda de ferro para a espuma entre 4 e 6% com estabilização em 120 segundos. Portanto, todos os ensaios foram realizados com tempo de 180 segundos, sendo tempo seguro para ter a estabilidade do teste de flotação.

Figura 32 – Efeito do tempo na rejeição de sílica para diferentes águas.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Figura 32a – Variação da rejeição de ferro com diferentes águas.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

As variáveis respostas escolhidas para avaliar o efeito das diversas fontes de água no sistema de flotação foram (i) recuperação em massa, (ii) recuperação de ferro, (iii) índice de seletividade, (iv) redução do teor de SiO₂ no concentrado, (v) teor de Fe no rejeito e (vi) teor de SiO₂ no concentrado. As condições mantidas para todos os testes foram, pH inicial de 10, 1450 g/t de amido gelatinizado utilizado como depressor, 5 minutos como tempo de condicionamento do depressor, 150 g/t de amina Flotigram

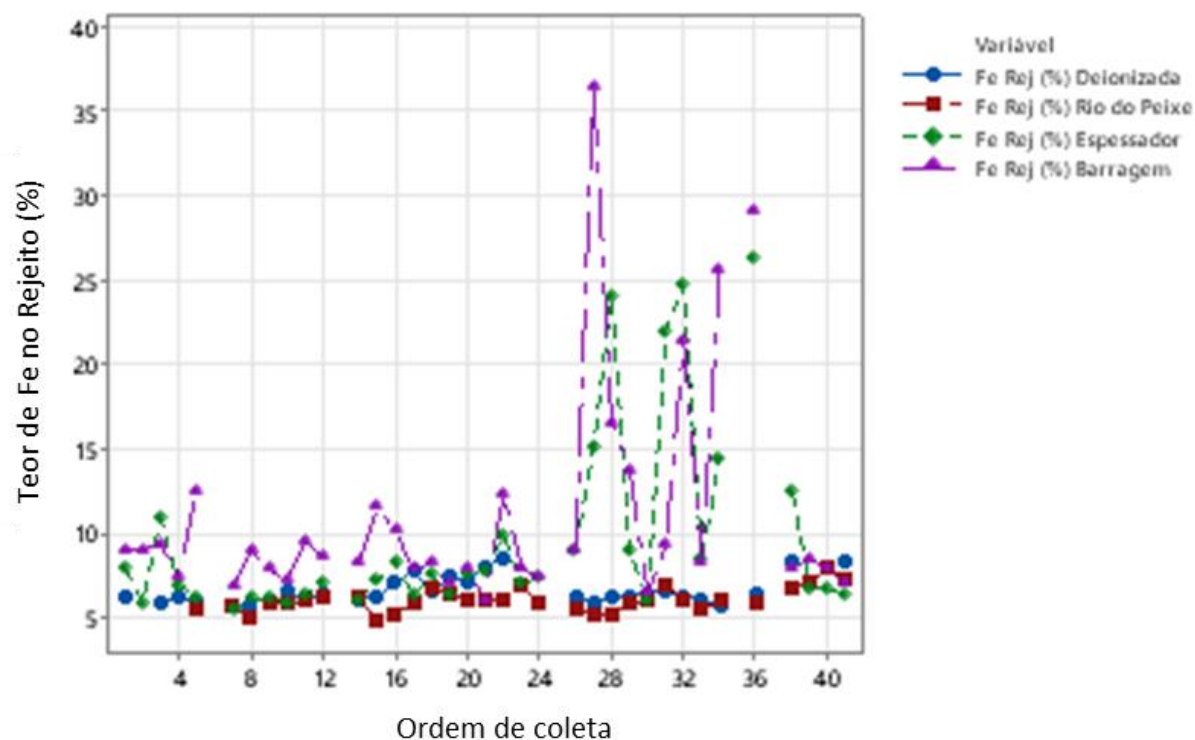
7500 como coletor, tempo de condicionamento de coletor de 1 minutos e rotação de flotação de 1300 RPM.

4.3.2 – Ensaios de Flotação

Foram realizados testes de flotação com cada uma das águas durante o ano de 2023. Ao todo foram 42 dias de flotação. Foram avaliados o teor de Fe no Rejeito, o teor de SiO₂ no concentrado, a recuperação em massa, a recuperação de Fe, o índice de seletividade e a redução de SiO₂

Avaliando o teor de ferro no rejeito (Figura 33) observa-se que as águas deionizadas e do Rio do Peixe promoveram um menor teor de Fe no rejeito, entre 6 e 6,6%, enquanto a água do espessador 9,6 % de ferro no rejeito e a água da barragem 11,0% de Fe no rejeito.

Figura 33 – Variação do teor de Fe no rejeito para os testes de flotação realizados com as diversas águas coletadas em diferentes dias.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Observa-se que dos pontos 25 ao 35 (coleta realizada de 05/07 a 11/09) os teores de Fe no rejeito foram maiores para ensaios utilizando as águas do espessador e da barragem.

A Tabela 28 compila as estatísticas básicas do teor de Fe no rejeito da flotação com as diferentes águas.

Tabela 28 – Estatísticas básicas para o Fe no rejeito para os testes de flotação

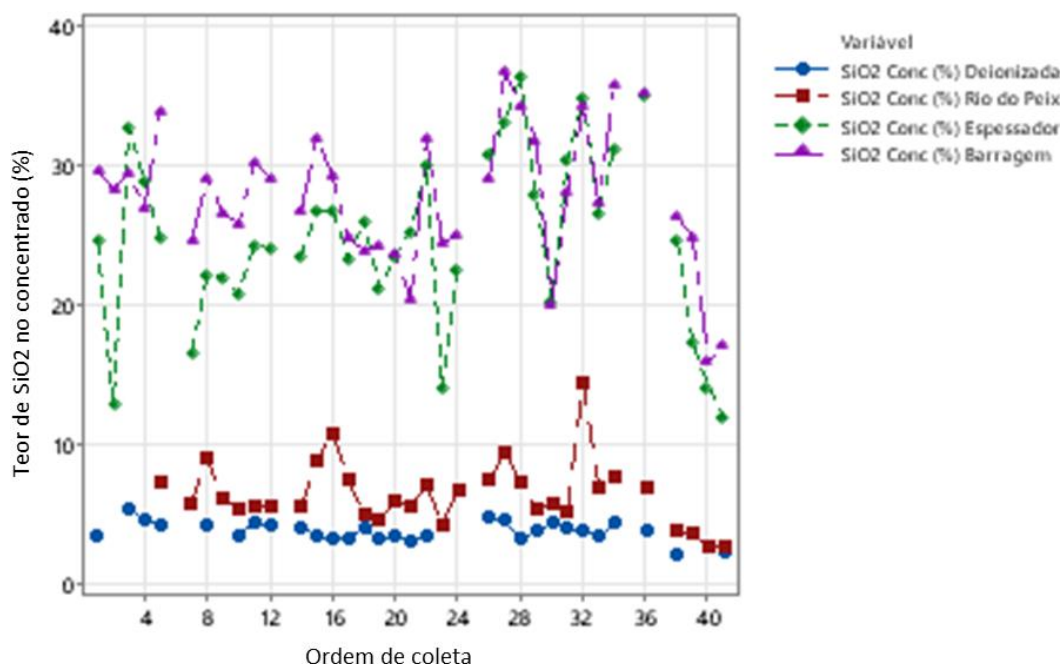
| Variável | N | Média | EP Média | DesvPad | Mínimo | Mediana | Máximo |
|-------------------------|----|-------|----------|---------|--------|---------|--------|
| Fe Rej (%) Deionizada | 29 | 6,629 | 0,153 | 0,825 | 5,675 | 6,300 | 8,530 |
| Fe Rej (%) Rio do Peixe | 32 | 6,032 | 0,123 | 0,698 | 4,880 | 5,960 | 7,990 |
| Fe Rej (%) Espessador | 36 | 9,639 | 0,955 | 5,732 | 5,465 | 7,287 | 26,335 |
| Fe Rej (%) Barragem | 36 | 11,05 | 1,13 | 6,78 | 6,02 | 8,52 | 36,60 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O efeito das características das águas apresentado no item anterior, se revela marcante, ao se verificar que a perda de ferro no rejeito aumentou seguindo a ordem água do rio do peixe>água deionizada>água do espessador>água da barragem. Também, os teores de sílica no concentrado foram substancialmente maiores e com maiores variações (Figura 34 e Tabela 29).

Fica marcante na figura 35 a formação de dois grupos quanto ao teor de SiO₂ no concentrado. A água do espessador e a água da barragem apresentaram maiores teores de SiO₂ no concentrado da flotação, com valores de 24,7 e 27,7%, respectivamente. As águas deionizadas e do Rio do Peixe formaram outro grupo onde os teores de SiO₂ no concentrado da flotação foram menores, 3,7 e 6,4%, respectivamente.

Figura 34 – Variações dos teores de sílica no concentrado da flotação para as diferentes fontes de água.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Tabela 29 compila as estatísticas básicas do teor de SiO₂ no concentrado da flotação com as diferentes águas.

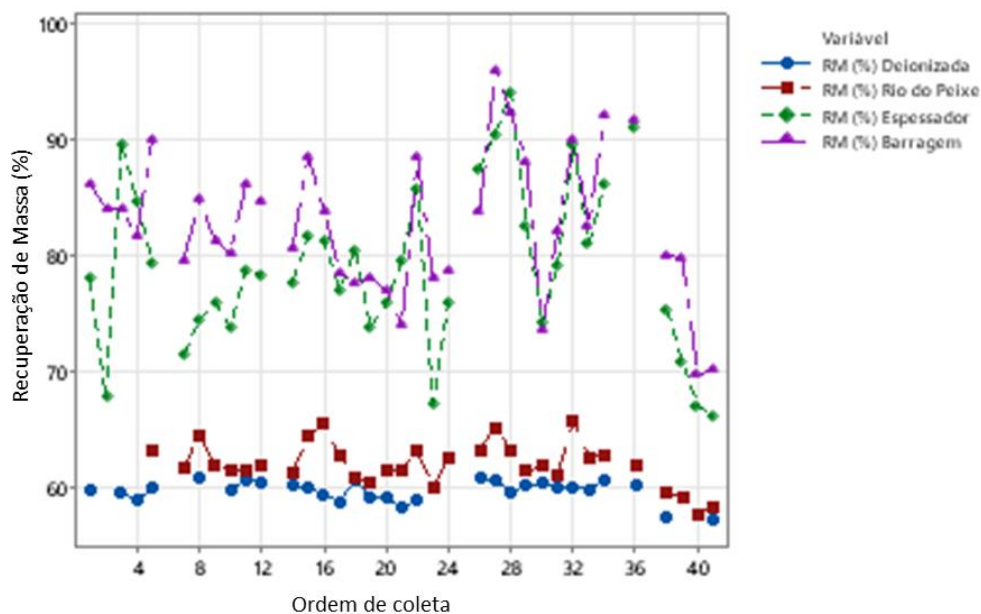
Tabela 29 – Estatísticas básicas do SiO₂ no concentrado para os testes de flotação

| Variável | N | Média | EP Média | DesvPad | Mínimo | Mediana | Máximo |
|----------------------------|----|--------|----------|---------|--------|---------|--------|
| SiO2 Conc (%) Deionizada | 29 | 3,763 | 0,132 | 0,714 | 2,080 | 3,750 | 5,416 |
| SiO2 Conc (%) Rio do Peixe | 32 | 6,432 | 0,416 | 2,353 | 2,610 | 5,860 | 14,420 |
| SiO2 Conc (%) Espessador | 36 | 24,76 | 1,05 | 6,31 | 11,86 | 24,58 | 36,53 |
| SiO2 Conc (%) Barragem | 36 | 27,711 | 0,827 | 4,962 | 16,005 | 27,678 | 36,801 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O comportamento de formação de dois grupos, um com valores mais altos e outros com valores mais baixos, foi verificado quando a variável resposta utilizada foi a recuperação em massa da flotação (Figura 35). Quando utilizadas a água deionizada ou água do Rio do Peixe foram obtidos valores de recuperação em massa entre 60 a 62%, respectivamente, e recuperações em massa de 79 a 83% foram obtidas quando utilizada a água do espessador e barragem, respectivamente.

Figura 35 – Séries temporais de recuperação em massa para os testes de flotação



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Tabela 30 compila as estatísticas básicas da recuperação em massa das flotações com as diferentes águas.

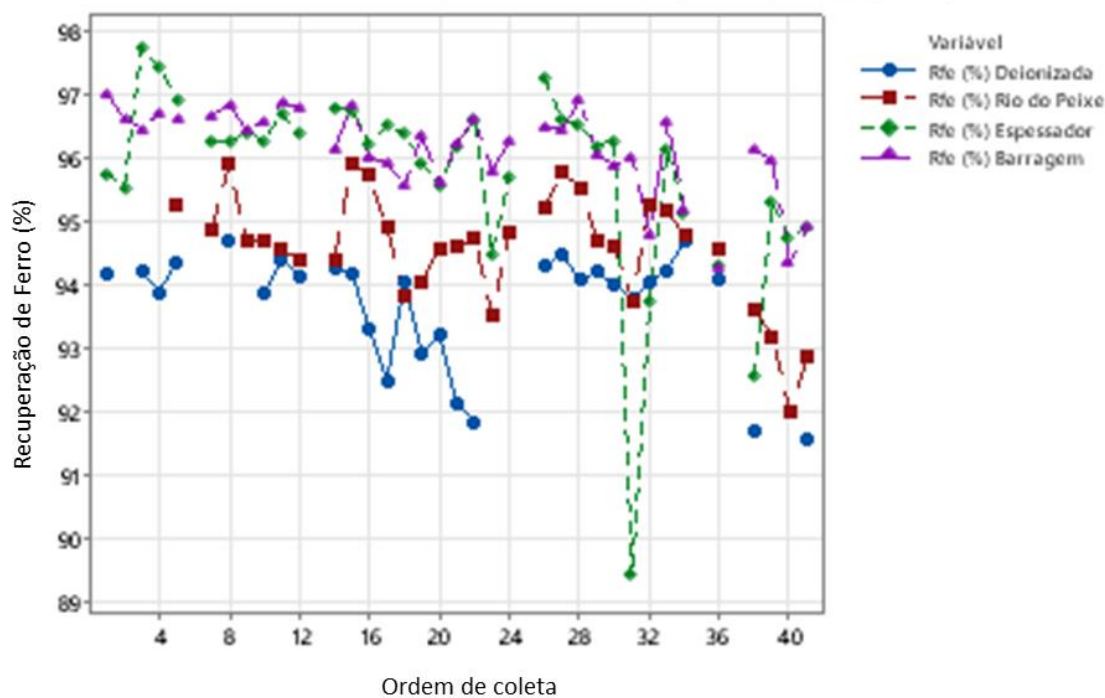
Tabela 30 – Estatísticas básicas da recuperação em massa para os testes de flotação

| Variável | N | Média | EP Média | DesvPad | Mínimo | Mediana | Máximo |
|---------------------|----|--------|----------|---------|--------|---------|--------|
| RM (%) Deionizada | 29 | 59,747 | 0,170 | 0,913 | 57,357 | 59,947 | 60,888 |
| RM (%) Rio do Peixe | 32 | 62,052 | 0,335 | 1,897 | 57,716 | 61,875 | 65,762 |
| RM (%) Espessador | 36 | 79,05 | 1,20 | 7,18 | 66,23 | 78,62 | 94,10 |
| RM (%) Barragem | 36 | 82,79 | 1,03 | 6,20 | 69,74 | 82,43 | 96,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Em se tratando da recuperação de ferro observou-se a tendência do comportamento do sistema quando água deionizada e a água do rio do peixe apresentam valores mais próximos entre si (Figura 36). O mesmo aconteceu para o sistema quando as águas dos espessadores e da barragem, sendo que a recuperação de ferro nas flotações utilizando água deionizada e do Rio do Peixe foram menores do que para as demais.

Figura 36 – Gráfico de séries temporais de recuperação de Fe para os testes de flotação



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Tabela 31 compila as estatísticas básicas da recuperação de ferro das flotações com as diferentes águas.

Tabela 31 – Estatísticas básicas para o Feno rejeito para os testes de flotação

| Variável | N | Média | EP Média | DesvPad | Mínimo | Mediana | Máximo |
|----------------------|----|--------|----------|---------|--------|---------|--------|
| Rfe (%) Deionizada | 29 | 93,694 | 0,170 | 0,915 | 91,555 | 94,076 | 94,711 |
| Rfe (%) Rio do Peixe | 32 | 94,572 | 0,157 | 0,886 | 92,002 | 94,686 | 95,900 |
| Rfe (%) Espessador | 36 | 95,780 | 0,252 | 1,514 | 89,387 | 96,243 | 97,741 |
| Rfe (%) Barragem | 36 | 96,139 | 0,117 | 0,703 | 94,251 | 96,301 | 97,026 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

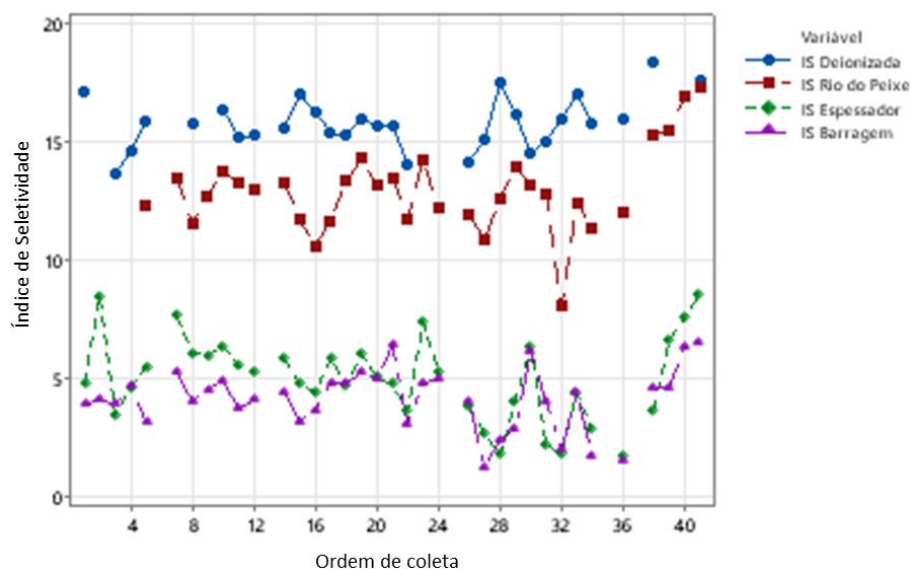
Uma das formas de avaliar a eficiência da flotação é calcular o Índice de Seletividade (IS), proposto por GAUDIN (1939) sob a seguinte equação 01.

$$IS = \sqrt{\frac{(Rec.Fe \text{ no concentrado}) \times (Rec.SiO_2 \text{ no rejeito})}{(Rec.SiO_2 \text{ no concentrado}) \times (Rec.Fe \text{ no rejeito)}}} \text{ (Eq.01)}$$

A avaliação do efeito da seletividade na flotação pode ser verificada através da figura

37. Observa-se que o maior índice de seletividade obtido se deu com o uso da água deionizada, seguido pela água do Rio do Peixe e posteriormente a água dos espessadores e da barragem com valores muito similares.

Figura 37 – Gráfico de séries temporais índice de seletividade para os testes de flotação



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Tabela 32 compila as estatísticas básicas do Índice de Seletividade das flotações com as diferentes águas.

Tabela 32 – Estatísticas básicas índice de seletividade para os testes de flotação

| Variável | N | Média | EP Média | DesvPad | Mínimo | Mediana | Máximo |
|-----------------|----|--------|----------|---------|--------|---------|--------|
| IS Deionizada | 29 | 15,794 | 0,206 | 1,107 | 13,634 | 15,772 | 18,418 |
| IS Rio do Peixe | 32 | 12,938 | 0,316 | 1,786 | 8,032 | 12,889 | 17,297 |
| IS Espessador | 36 | 4,974 | 0,302 | 1,814 | 1,672 | 4,911 | 8,583 |
| IS Barragem | 36 | 4,127 | 0,218 | 1,310 | 1,252 | 4,232 | 6,479 |

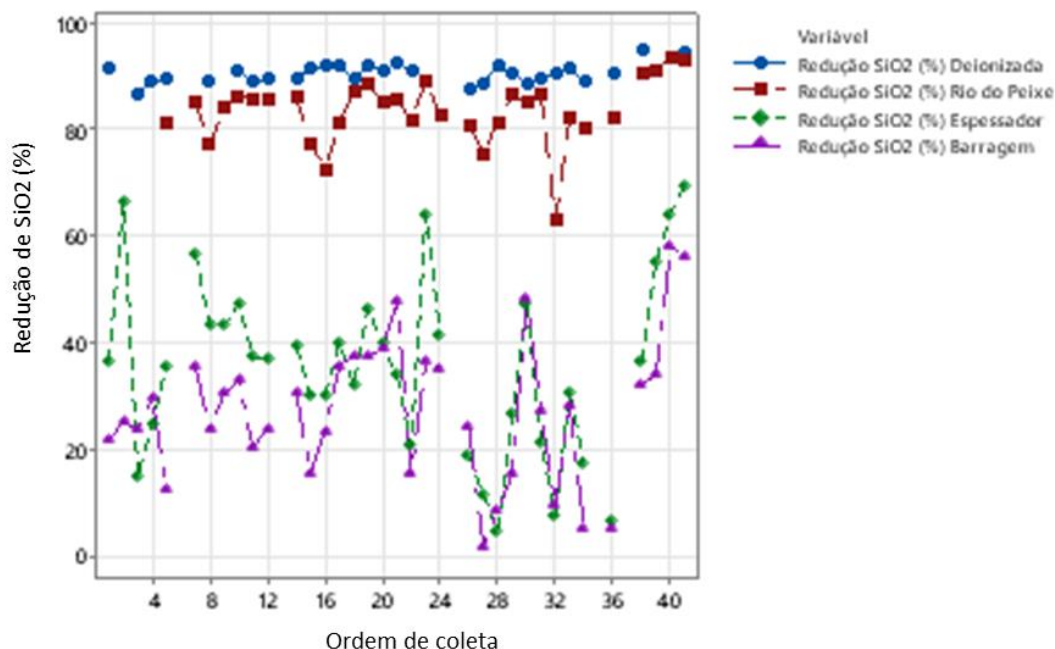
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Utilizando a recuperação de sílica no rejeito, isto é, a porcentagem de sílica que foi enviada para o rejeito, segundo a equação 02, pode-se avaliar a eficiência da flotação.

$$\text{Redução de SiO}_2 = \frac{[\text{massa SiO}_2 \text{ alimentação}] - [\text{massa SiO}_2 \text{ concentrado}]}{[\text{massa SiO}_2 \text{ alimentação}]} * 100 \quad (\text{Eq.2})$$

A Figura 38 apresenta as séries temporais com os valores de redução de sílica para as flotações de bancada feitas com diferentes tipos de águas.

Figura 38 – Gráfico de séries temporais de redução de SiO₂ para os testes de flotação



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Avaliando-se o gráfico de séries temporais, dois grupos de comportamento de recuperação de sílica no rejeito podem ser observados. O primeiro grupo composto pela água deionizada e pela água do Rio do Peixe apresentam maior redução de sílica, tem menor variabilidade e seguem um perfil mais estável ao longo do ano. O segundo grupo, composto pela água da barragem e dos espessadores tem um valor médio de redução de sílica menor e maior variabilidade nos resultados. A Tabela 33 compila as estatísticas básicas da redução de SiO₂ da flotação com as diferentes águas.

Tabela 33 – Estatísticas básicas da redução de SiO₂ para os testes de flotação

| Variável | N | Média | EP Média | DesvPad | Mínimo | Mediana | Máximo |
|---|----|--------|----------|---------|--------|---------|--------|
| Redução SiO ₂ (%) Deionizada | 29 | 90,264 | 0,330 | 1,775 | 86,468 | 90,238 | 94,514 |
| Redução SiO ₂ (%) Rio do Peixe | 32 | 83,37 | 1,07 | 6,05 | 62,80 | 85,06 | 93,30 |
| Redução SiO ₂ (%) Espessador | 36 | 35,34 | 2,84 | 17,03 | 4,42 | 36,19 | 69,38 |
| Redução SiO ₂ (%) Barragem | 36 | 27,18 | 2,28 | 13,65 | 1,50 | 27,34 | 57,79 |

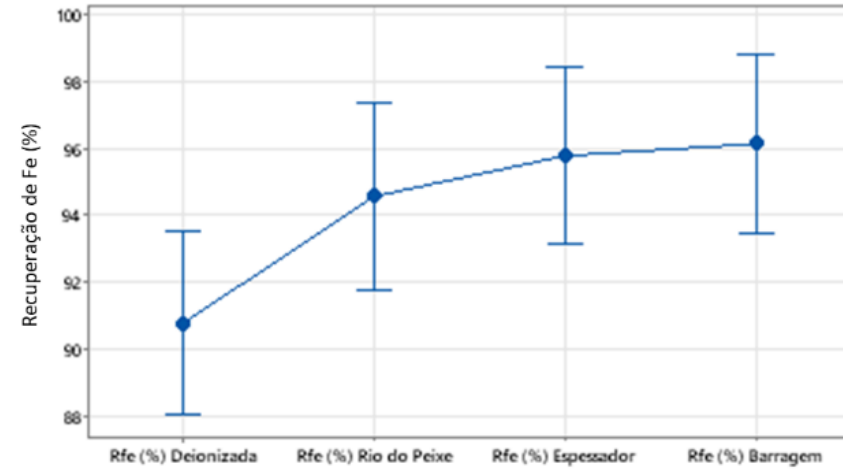
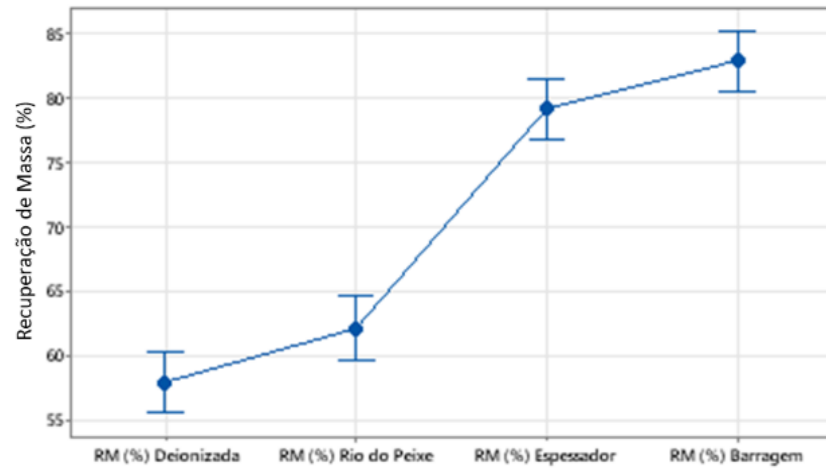
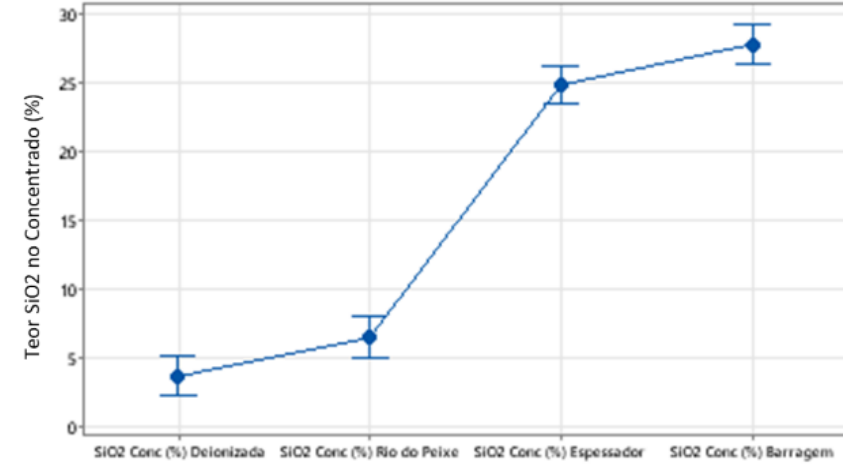
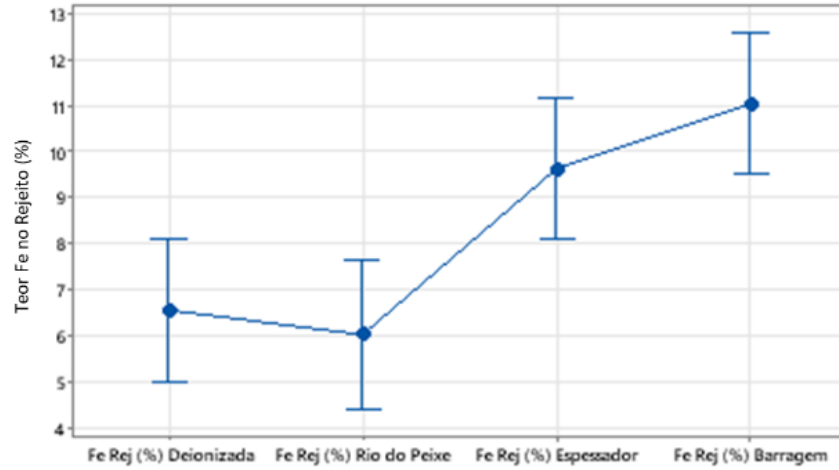
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

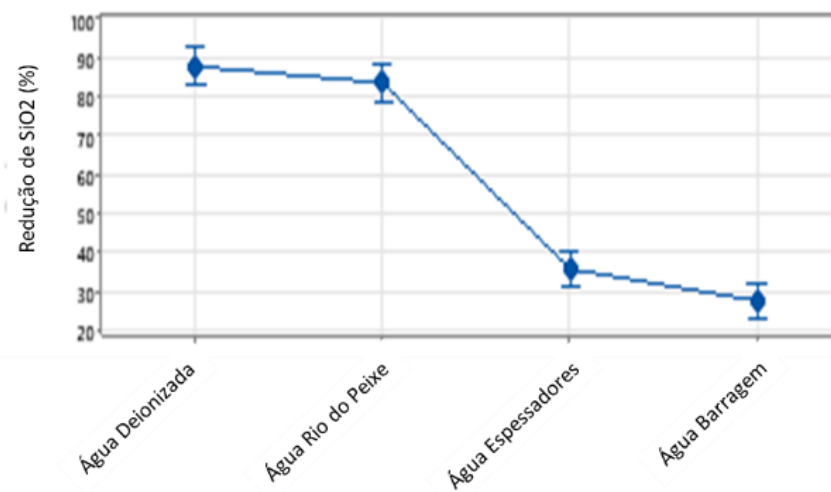
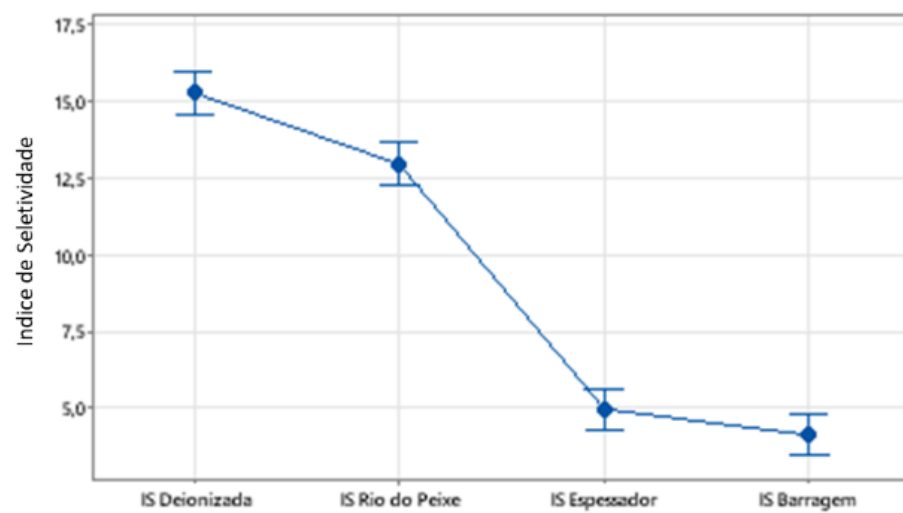
A figura 39 apresenta um resumo dos indicadores de eficiência dos testes de flotação em bancada efetuados nesse estudo. Observando os resultados, percebe-se que as águas deionizadas e do Rio do Peixe propiciaram performances melhores na flotação.

Segundo as análises ANOVA, os comportamentos do sistema quando utilizadas as águas deionizadas e do Rio do Peixe são estatisticamente iguais, valendo o mesmo para as águas dos espessadores e da barragem. As águas deionizadas e do Rio do Peixe quando utilizadas na flotação geraram rejeitos com teores mais baixos de ferro, maiores teores de sílica no concentrado e menor recuperação de massa. Já as águas dos espessadores e da barragem favoreceram a obtenção de rejeitos com teores maiores de ferro, maiores teores de sílica no concentrado e maior recuperação em massa.

Observando a análise ANOVA para a recuperação de ferro, verifica-se que todas as águas têm comportamentos estatisticamente iguais. Para o índice de seletividade a água deionizada proporcionou flotações com maior seletividade, a água do Rio do Peixe teve um comportamento diferente estatisticamente, porém próximo da água deionizada. As águas dos espessadores e da barragem tiveram comportamentos estatisticamente iguais para a seletividade e esse comportamento foi de uma seletividade muito menor do que a quando utilizadas a água deionizada e a água do Rio do Peixe. Pode-se dizer que a recuperação de sílica no rejeito seguiu o mesmo comportamento da seletividade.

Figura 39 – Análises anova dos resultados dos testes de flotação para cada água





Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.3.3 Flotação com águas tratadas por filtração e clarificação

Visando avaliar o efeito de um tratamento simplificado das águas na performance da flotação, foram feitos alguns testes com as águas in natura e com a água tratada. As águas coletadas no dia 08/01/2024 foram utilizadas nesses testes. Observou-se que antes do tratamento a água dos espessadores apresentou alta turbidez (maior que 4000 NTU), a água da barragem 431 NTU e similar a água do rio do peixe, com turbidez de 511NTU.

Após clarificadas, utilizando 150 g/t de coagulante polydadimace 50 g/t de floculante poliacrilamida, essas águas apresentaram turbidez de 1 a 10 NTU. Esse foi um dia em que a água dos espessadores estava especialmente alterada, apresentando altos valores de turbidez. A tabela 34 apresenta os resultados obtidos nos testes de flotação com águas das diferentes fontes tanto in natura e quanto após a clarificação.

Tabela 34 – Testes de flotação com água *in natura* e depois de tratadas por clarificação

| Teste com águas | Fe Rej (%) | | SiO2 Conc (%) | | RM (%) | | Rfe (%) | | IS | |
|-----------------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| | Água In Natura | Água Clarificada | Água In Natura | Água Clarificada | Água In Natura | Água Clarificada | Água In Natura | Água Clarificada | Água In Natura | Água Clarificada |
| Água deionizada | 6,00 | | 5,21 | | 61,02 | | 94,43 | | 14,39 | |
| Água dos Espessadores | 46,75 | 11,21 | 30,30 | 33,24 | 84,98 | 85,34 | 96,31 | 95,82 | 0,95 | 3,07 |
| Água da Barragem | 12,70 | 27,68 | 33,98 | 31,09 | 89,37 | 86,19 | 96,65 | 91,16 | 2,86 | 1,80 |
| Água do Rio de Peixe Normal | 10,93 | 8,48 | 26,89 | 26,01 | 80,14 | 81,65 | 94,61 | 96,24 | 3,68 | 4,39 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Observa-se que as maiores diferenças nos resultados ocorreram quando a água dos espessadores foi utilizada, a que apresentou maior turbidez inicial. Um aumento de até 3 vezes no índice de seletividade da flotação foi observado, quando utilizada a água do overflow dos espessadores, o que foi atribuído ao efeito do tratamento simplificado, que propiciou uma clarificação efetiva com redução da turbidez de 4000 NTU para 10NTU. Também, verificou-se uma redução do teor de ferro no rejeito. Entretanto, a recuperação metalúrgica de Fe caiu de 96,31% para 95,82%.

Um ponto relevante é que quando utilizada a água da barragem, após o seu tratamento de clarificação, houve um decréscimo no índice de seletividade.

O teor de ferro no rejeito das flotações com água do espessador e do rio do peixe diminuíram. Utilizando a água da barragem o teor de ferro no rejeito aumentou após a clarificação, e valores do teor de SiO_2 no concentrado da flotação apresentou pequena alteração, independentemente do tratamento. O tratamento não alterou a recuperação de massa. O que chama a atenção nos dados foi a diminuição da recuperação de ferro quando utilizando a água clarificada.

Apenas o uso da água da barragem causou um decréscimo do índice de seletividade da flotação quando se comparado aos valores obtidos para a flotação com água in natura e a água clarificada. Como mencionado anteriormente, a maior presença de íons na água, que não são removidos pela clarificação, na água da barragem, a que tem a maior condutividade, pode ser a causa dos efeitos observados.

No dia 16/01/2024, uma nova coleta de águas foi realizada. As águas foram separadas em águas in natura e a segunda parte de cada tipo de água foi filtrada em filtro de pressão com papel de filtro com gramatura de 80 g/m^2 e poros de tamanho máximo de 3 micrometros como meio filtrante. A água dos espessadores apresentaram turbidez de 247 NTU, a água da barragem 646 NTU e a água do rio do peixe apresentou turbidez de 15 NTU. Após filtradas, essas águas ficaram límpidas, isto é, apresentaram turbidez de 1 a 10 NTU.

As águas antes do tratamento apresentaram condutividade medida de (i) água dos espessadores $694 \mu\text{S}$, (ii) água da barragem $716 \mu\text{S}$, água do rio do peixe água $38 \mu\text{S}$. Esse foi um dia normal de operação, sem grandes anomalias na qualidade das águas, sendo que a qualidade da água do Rio do Peixe estava muito boa, com baixa turbidez e condutividade. A Tabela 35 a seguir mostra os resultados das flotações com as águas antes e depois da filtragem.

Tabela 35 – Resultados dos testes com águas in natura e após tratamento por filtração.

| Teste com águas | Fe Rej (%) | | SiO ₂ Conc (%) | | RM (%) | | Rfe (%) | | IS | |
|-----------------|-------------------|------------------|---------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | Água In Natura | Água Filtrada | Água In Natura | Água Filtrada | Água In Natura | Água Filtrada | Água In Natura | Água Filtrada | Água In Natura | Água Filtrada |
| Água deionizada | 11,84 | 12,89 | 2,32 | 2,07 | 55,69 | 53,93 | 87,75 | 86,03 | 14,16 | 14,28 |
| Água Espessador | 6,78 | 6,72 | 16,16 | 18,38 | 68,62 | 73,23 | 94,83 | 95,77 | 6,82 | 6,39 |
| Água Barragem | 7,74 | 9,12 | 23,49 | 26,09 | 78,15 | 81,43 | 95,94 | 95,98 | 4,98 | 4,25 |
| Rio de Peixe | 6,83 | 7,29 | 4,08 | 3,09 | 59,60 | 58,91 | 93,45 | 92,92 | 14,61 | 16,29 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Avaliando os resultados das flotações com as águas in natura e as águas pós-tratamento por filtragem, não se percebe diferença, isto é, o tratamento de filtragem não alterou a eficiência da flotação. Isso indica que não é a presença de sólidos coloidais ou suspensos que causaram a pior eficiência da flotação com águas mais “suja”. Com isso tem-se indícios substanciais que o fator que influencia na eficiência da flotação são os elementos ou substâncias dissolvidas nessas águas, o que é avaliado na seção seguinte.

4.3.4 Modelo estatístico do desempenho da flotação

Para entender melhor a influência dos íons e demais características das águas foi realizada uma avaliação estatística dos efeitos e obtido um modelo de regressão multivariáveis no software Minitab em sua versão 22. O método utilizado no software foi o ajuste de modelo por regressão com *Stepwise*, com eliminação *Backward*, e com fator alfa para remoção da variável de 0,08 (92% de confiança). Isto significa que o software faz uma primeira regressão com todas as variáveis e então é avaliado o p-valor de cada variável preditora. A variável preditora com maior p-valor é então removida da regressão. Como cada variável pode influenciar em outra e em consequência mudar todo o comportamento do modelo, uma nova regressão é realizada. A avaliação dos valores é feita novamente e a variável da maior p-valor é retirada e o modelo de regressão é obtido novamente. Esse processo continua até que não exista nenhuma variável com p-valor maior que 0,08.

Para o Índice de Seletividade, que é o indicador mais relevante das flotações, o modelo mais adequado obtido utilizando o IS como variável resposta, e [Al] (mg/L); [Ba] (mg/L); [Ca] (mg/L); [Fe] (mg/L); [K] (mg/L); [Mg] (mg/L); [Mn] (mg/L); [Na] (mg/L);

[P] (mg/L); [Si] (mg/L); [Ti] (mg/L); pH; ORP (mV); [Oxigênio Dissolvido] (mg/L); Condutividade (μS); Turbidez (NTU) como variáveis preditoras, é apresentado a seguir na equação 3. A tabela 36 apresenta os resultados da análise estatística.

$$IS = 15,304 + 1,932 Al(\text{mg/L}) - 0,336 Ca(\text{mg/l}) - 0,2103 Fe(\text{mg/l}) - 3,020 Ti(\text{mg/l}) - 0,015084 \text{Condutivid} \quad (\text{Eq. 03})$$

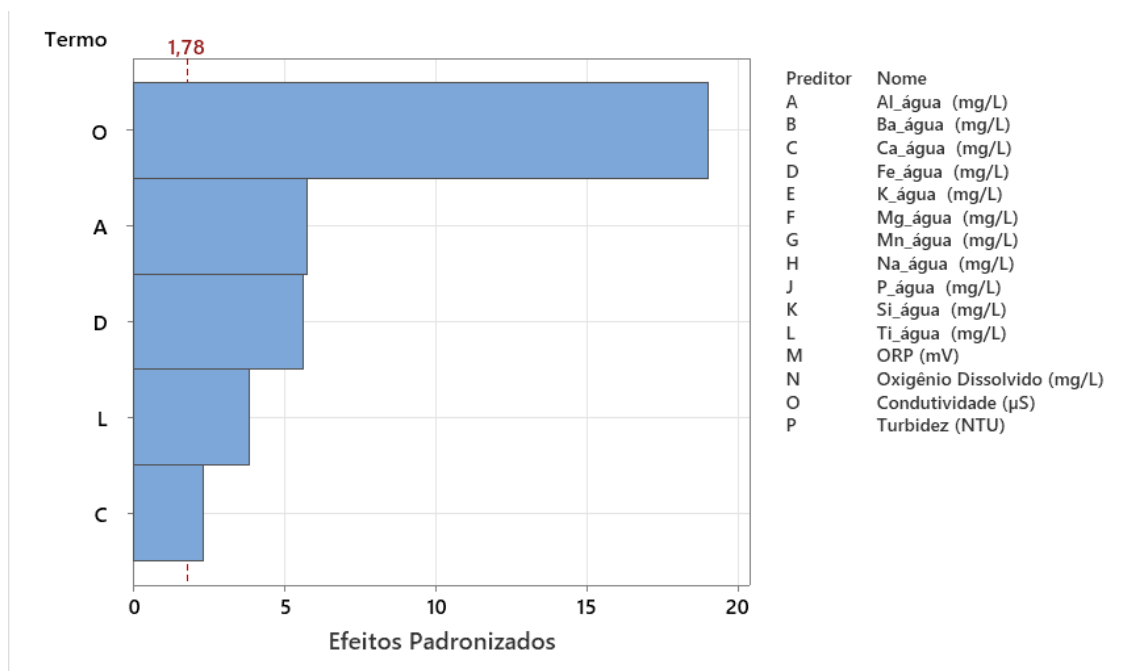
Tabela 36 – Resultado estatístico do modelo matemático multivariado.

| Termo | Coef | EP de Coef | Valor-T | Valor-P | VIF |
|---------------------------------|-----------|------------|---------|---------|--------|
| Constante | 15,304 | 0,301 | 50,77 | 0,000 | |
| Al_água (mg/L) | 1,932 | 0,336 | 5,76 | 0,000 | 391,58 |
| Ca_água (mg/L) | -0,336 | 0,144 | -2,33 | 0,023 | 2,61 |
| Fe_água (mg/L) | -0,2103 | 0,0373 | -5,64 | 0,000 | 378,54 |
| Ti_água (mg/L) | -3,020 | 0,788 | -3,83 | 0,000 | 3,93 |
| Condutividade (μS) | -0,015084 | 0,000793 | -19,02 | 0,000 | 1,95 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O ajuste do modelo estatístico para as condições estudadas foi relativamente bom, com um R^2 de 92,95%, R^2 ajustado de 92,41% e um R^2 predito de 88,81%. Esses valores mostram que o modelo tem uma boa aderência. Os fatores mais influentes no índice de seletividade são, em ordem crescente, a condutividade, e as concentrações de Al, Fe, Ti e o Ca. Observa-se que os íons Al, quando tem seu valor aumentado, contribui para um maior índice de seletividade da flotação, ao contrário dos íons Ca, Fe, Ti e a condutividade, que quanto maior os valores destes, diminuem o índice de seletividade, segundo o modelo matemático obtido. Essa análise também pode ser verificada pelo gráfico apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Gráfico de Pareto dos parâmetros que mais influenciam o índice de seletividade da flotação. Alfa=0,08.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Portanto, para melhorar o desempenho da flotação utilizando águas com maior conteúdo desses elementos, deve-se buscar tratamentos que reduzam o conteúdo destes elementos.

Com a mesma base de dados obteve-se modelos estatísticos da flotação para a recuperação de Fe, recuperação em massa, concentração de Fe no rejeito, concentração de SiO₂ no concentrado e Rejeição de SiO₂. O modelo obtido para a recuperação de ferro é apresentado na equação 04. Esse modelo teve um R² predito de 74,14% demonstrando uma aderência regular.

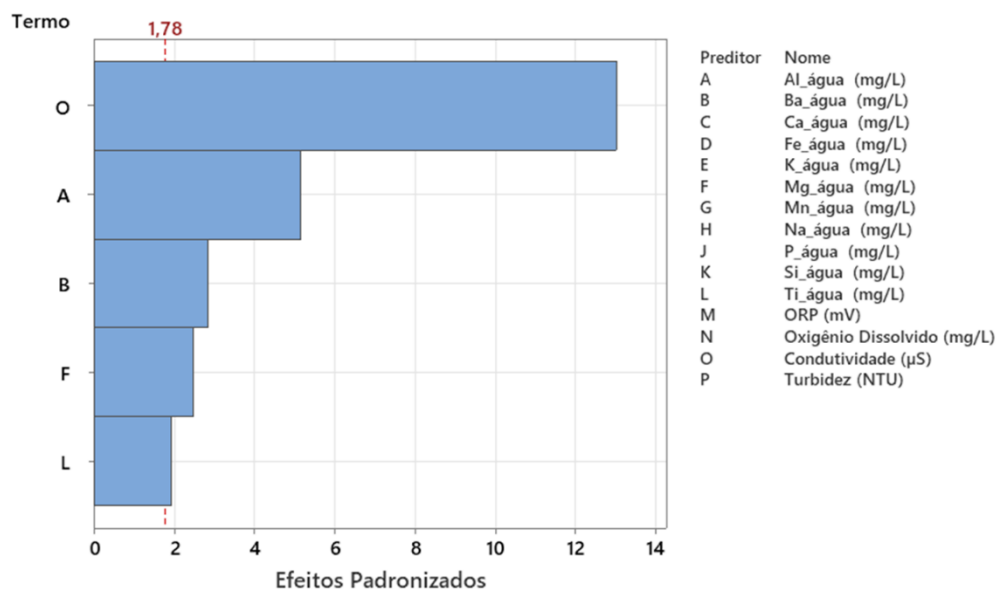
$$RFe = 94,005 - 0,2245 Al(mg/L) + 3,06 Ba(mg/l) + 0,789 Mg (mg/L) + 0,635 Ti (mg/L) + 0,003327 Condutividade (\mu S) \quad (\text{Eq. 04})$$

$$R^2 \text{ Predito} = 74,14\%$$

O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados mostra que a variável que mais se destaca é a condutividade, seguido da concentração de Al e posteriormente a concentração de Ba. Podemos ver que a condutividade tem um destaque muito grande, tendo o fator de

significância muito maior que a segunda variável mais importante.

Figura 41 – Gráfico de Pareto dos parâmetros que mais influenciam a recuperação de Fe.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O modelo obtido para a recuperação de massa é descrito pela equação a seguir. Esse modelo teve um R^2 predito de 84,74% demonstrando uma boa aderência.

$$RM = 60,144 - 4,791 Al(mg/L) + 1,268 Ca(mg/l) + 0,458 Fe(mg/l) + 0,13938 Na(mg/l) + 6,47 P(mg/l) + 3,86 Ti(mg/l) \quad (\text{Eq. 05})$$

O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados mostra que a variável que mais se destaca é a concentração de Na, seguido da concentração de Al e posteriormente a concentração de Fe. Podemos ver que a concentração de Na tem um destaque muito grande, tendo o fator de significância muito maior que a segunda variável mais importante.

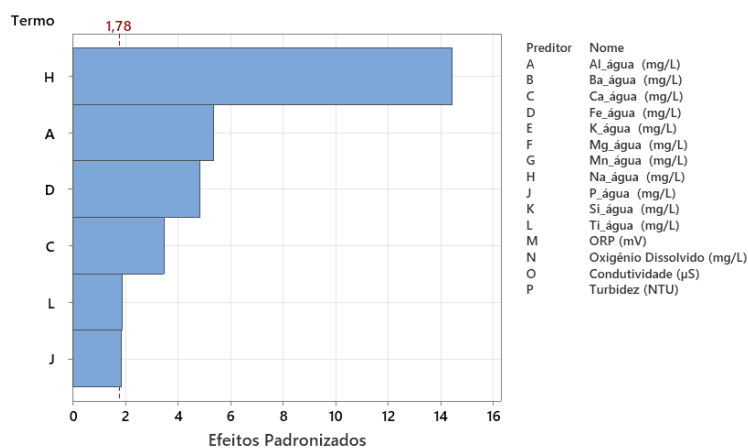
O modelo obtido para o teor de SiO_2 no concentrado é descrito pela equação a seguir. Esse modelo teve um R^2 predito de 90,02% demonstrando uma boa aderência.

$$SiO_2 \text{ Conc (\%)} = 4,310 - 3,748 Al(mg/L) + 1,184 Ca(mg/l) + 0,4180 Fe(mg/l) + 0,14530 Na(\quad (\text{Eq. 06})$$

O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados mostra que a variável que mais se destaca

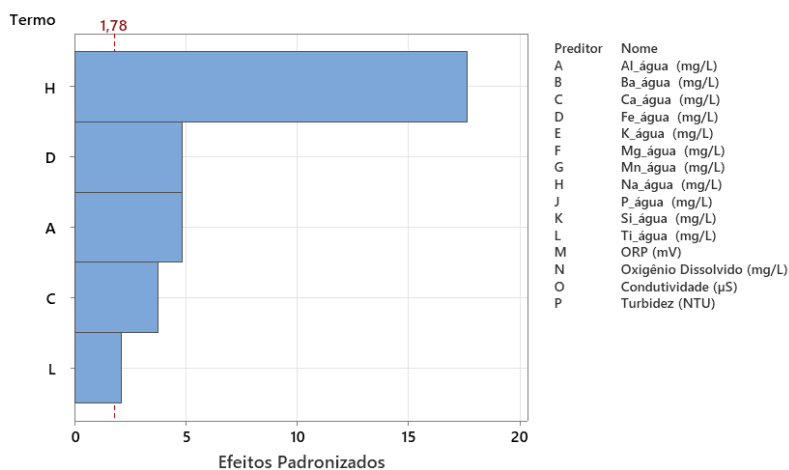
é a concentração de Na, seguido da concentração de Fe e posteriormente a concentração de Al. Podemos ver que a concentração de Na tem um destaque muito grande, tendo o fator de significância muito maior que a segunda variável mais importante.

Figura 42 – Gráfico de Pareto dos parâmetros que mais influenciam a recuperação em massa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 43 – Gráfico de Pareto dos parâmetros que mais influenciam o teor de SiO₂ no concentrado



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O modelo obtido para a rejeição de SiO₂ é descrito pela equação 07. Esse modelo teve um R² predito de 89,65% demonstrando uma boa aderência.

$$\text{Redução SiO}_2 (\%) = 89,02 - 10,25 \text{ Al}(\text{mg/L}) - 3,062 \text{ Ca}(\text{mg/L}) - 1,140 \text{ Fe}(\text{mg/L})$$

$$-0,3826 Na(mg/l) -10,31 Ca(mg/l) \quad (\text{Eq. 07})$$

O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados mostra que a variável que mais se destaca é a concentração de Na, seguido da concentração de Al e posteriormente a concentração de Fe. Pode-se ver que a concentração de Na tem um destaque muito grande, tendo o fator de significância muito maior que a segunda variável mais importante.

Avaliando os modelos estatísticos por regressão multivariável para os principais indicadores da eficiência da flotação percebe-se que a condutividade, a concentração de Na, a concentração de Al e a concentração de Fe da água são as principais variáveis que influencia a qualidade da flotação.

A tabela 37 apresenta para os vários modelos estatísticos de regressão multivariada os fatores que mais influenciam nas variáveis respostas:

Tabela 37 – Variáveis importantes dos modelos matemáticos multivariados.

| Modelos de regressão multivariável | | | | | | | |
|---|------------------------------|------|------|------|------|-----|--------------------|
| Variável resposta | Fatores relevantes ao modelo | | | | | | |
| | 1º | 2º | 3º | 4º | 5º | 6º | R ² (%) |
| Índice de Seletividade | Cond. | [Al] | [Fe] | [Ti] | [Ca] | | 92,95 |
| Recuperação de Fe | Cond. | [Al] | [Ba] | [Mg] | [Ti] | | 74,14 |
| Recuperação em Massa | [Na] | [Al] | [Fe] | [Ca] | [Ti] | [P] | 84,74 |
| Teor de SiO ₂ no concentrado | [Na] | [Fe] | [Al] | [Ca] | [Ti] | | 90,02 |
| Rejeição de SiO ₂ | [Na] | [Al] | [Fe] | [Ca] | [Ti] | | 89,65 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

5. CONCLUSÕES

A caracterização das águas mostrou que existem dois grupos distintos de águas, um grupo composto de águas mais “limpas”, isto é, consistentemente médias menores de íons dissolvidos, menor turbidez e menor condutividade elétrica, sendo esse grupo composto pela água deionizada e pela água do Rio do Peixe. O outro grupo é composto pelas águas da barragem e dos overflows dos espessadores, que se apresentaram com maiores valores médios de íons dissolvidos, bem como maiores valores de condutividade e turbidez.

Na avaliação do desempenho da flotação com diferentes águas pode-se perceber que as águas mais “limpas”, grupo representado pela água deionizada e da água do Rio do Peixe, geram uma melhor performance na flotação, isto é, apresentam índices de seletividades maiores, da ordem de 13 a 15 e uma rejeição de sílica também maior, da ordem de 83 a 90%, frente ao outro grupo, composto pela água dos espessadores e água da Barragem, que apresentaram índice de seletividade entre 4 e 5 e rejeição de sílica de 27 a 35%.

O efeito, na flotação, de métodos simples de tratamento de águas, como filtração e a clarificação foi avaliado. A clarificação, feita em uma situação crítica de qualidade da água de reuso na planta industrial de beneficiamento, se mostrou ligeiramente útil, principalmente para a água dos espessadores, que apresentou elevada turbidez, e uma melhoria da performance da flotação foi observada. Entretanto, o tratamento não foi expressivo para a água da barragem e para a água do rio do peixe. Já a filtração de todas as águas não mostrou alteração na performance da flotação. Com isso podemos inferir que os particulados em suspensão nas águas não são um fator que atrapalha a performance da flotação que está mais correlacionada com os íons dissolvidos na água. Construído o modelo matemático multivariável para os íons dissolvidos, turbidez, oxigênio dissolvido, condutividade e ORP. O modelo teve boa aderência, apresentando um R^2 predito de 89,01%. Apenas os íons Al, Ba, Mn, P e Ti, em conjunto com o oxigênio dissolvido e a condutividade apresentaram relevância estatística na influência do Índice de Seletividade da flotação, sendo que a condutividade é o fator que se mostrou mais relevante.

6. SUGESTÃO PARA ESTUDOS FUTUROS

Para próximos trabalhos sugere-se que sejam investigados os seguintes pontos:

- Avaliar métodos de tratamento de águas capazes de reduzir o conteúdo de elementos dissolvidos;
- Alterar as dosagens de reagentes visando tornar a flotação mais robusta.

7. REFERÊNCIAS

- ADAM, K., NATARAJAN, K.A., IWASAKI, I. Grinding media wear and its effect on the flotation of sulfide minerals. **Int. J. Miner. Process.** 12, pp. 39–54, 1984.
- ALI, S.A., GAUGLITZ, P.A., ROSSEN, W.R.. Stability of solids-coated liquid layers between bubbles. **Ind. Eng. Chem. Res.** 39, pp. 2742–2745, 2000.
- ARANTES, R. de s. **Influência de silicato de sódio de diferentes módulos e fluorsilicato de sódio na flotação direta de minério de ferro.** 149 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- BALTAR, C. A. M. **Flotação no tratamento de minérios.** 2 a Ed. Recife: Universitária da UFPE, 2010.
- BALTAR, C.A.M.; CUNHA, A.S.F. Influência de espécies catiônicas na flotação de feldspato com amina. In: **XIX Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa**, 2002, Recife.
- BATISTELI, G. M. B. **Amina residual na flotação catiônica reversa de minério de ferro.** 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- BATISTELI, G.M.B., PERES, A.E.C. Residual amine in iron ore flotation. **Miner. Eng.** 21, PP. 873–876, 2008.
- BICHUETI, R. S.; GOMES, C. M.; KNEIPP, J.M.; ROSA, L. A. B. Gestão estratégica do uso da água na mineração: um estudo multicase em empresas brasileiras. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 9, n. 2, pp. 102-119, 2015.
- BICHUETI, R. S.; MADRUGA, L. R. R. G.; GOMES, C. M.; ROSA, L. A. B. O uso da água na mineração: uma análise da produção científica internacional. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, vol. 3, n. 2, pp. 58-73, 2014.
- BIÇAK, Ö., EKMEKÇI, Z., CAN, M., ÖZTÜRK, Y. The effect of water chemistry on froth stability and surface chemistry of the flotation of a Cu–Zn sulfide ore. **Int. J. Miner. Process.**, 2012.
- BOURNIVAL, G., PUGH, R.J., ATA, S. Examination of NaCl and MIBC as bubble coalescence inhibitor in relation to froth flotation. **Miner. Eng.** 25, pp. 47–53, 2012.
- CARVALHO, B. C. L. DE. **Aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

CARVALHO, M. R. DE. **Interferência de cátions Ca^{2+} nas etapas de deslamagem e flotação de minério de ferro.** 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

CARVALHO, V. V. **Mercado internacional de minério de ferro.** 35 f. Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CASSOLA, M. S.; BARTALINI, N. M.; Comportamento de coletores para o tratamento dos minérios de ferro através da flotação reversa. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, v. 6, n. 4, pp. 215-219, abr.-jun. 2010.

CHEN, S., GONG, W., MEI, G., ZHOU, Q., BAI, C., XU, N. Primary biodegradation of sulfide mineral flotation collectors. **Miner. Eng.** 24, pp. 953–955, 2011.

CHANDRA, A.P., GERSON, A.R. A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite. **Adv. Colloid interface sci.** 145, pp. 97–110, 2009.

CRUZ, D. G. **Estudos de complexação dos íons Ca^{2+} e Mg^{2+} na flotação catiônica de minério de ferro.** 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

CRUZ, D. G. **Influência dos íons Ca^{2+} , Mg^{2+} e Mn^{2+} na flotação catiônica de minério de ferro: estudos de bancada.** 74 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

DEPARTMENT OF RESOURCES ENERGY AND TOURISM. **Leading practice sustainable development program for the mining industry** – water management. Australia: Department of Resources Energy and Tourism, 2008

FARROKHPAY, S., ZANIN, M. An investigation into the effect of water quality on froth stability. **Adv. Powder Technol.** 23, PP. 493–497, 2012.

FERNANDES, HANA DALILA. **Reciclagem de éter-aminas, utilizadas na flotação de minério de ferro, através da adsorção.** 90 f. Dissertação (Mestrado em engenharia ambiental) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

FINKELSTEIN, N.P. The activation of sulphide minerals for flotation: a review. **Int. J. Miner. Process.** 52, pp. 81–120, 1997.

FONT, R., GARCIA, P., RODRIGUEZ, M. Sedimentation test of metal hydroxides: hydrodynamics and influence of pH. **Colloids surf. A** 157, pp. 73–84, 1999.

FORNASIERO, D., RALSTON, J. Effect of surface oxide/hydroxide products on the collectorless flotation of copper-activated sphalerite. **International Journal of Mineral Processing.** 78, pp. 231–237, 2006.

FREEMAN, W.A., NEWELL, R., QUAST, K.B.. Effect of grinding media and na copper recovery at northparkes mines. **Miner. Eng.** 13, pp. 1395–1403, 2000.

FUERSTENAU, M.C., MILLER, J.D., KUHN, M.C. **Chemistry of flotation**. Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical And Petroleum Engineers, 1985.

GAUDIN, A. M. **Principles of mineral dressing**. New Delhi: McGraw-Hill, 1939.

GRANO, S. The critical importance of the grinding environment on fine particle recovery in flotation. **Miner. Eng.** 22, pp. 386–394, 2009.

GRANO, S., RALSTON, J., SMART, R.S.C. Influence of electrochemical environment on the flotation behaviour of mt. Isa copper and lead–zinc ore. **Int. J. Miner. Process.** 30, pp. 69–97, 1990.

GUIMARÃES, D.; LOPES, K. C. S.; RODRIGUES, M. L. M.; BERTOLINO, S. M.; LEÃO, V. A. Tratamento de efluentes ácidos ricos em metais com auxílio de sulfeto biogênico e cal. **Holos**, vol. 3, pp. 332–340, 2014.

HEWITT, D., FORNASIERO, D., RALSTON, J. Bubble particle attachment efficiency. **Miner. Eng.** 7, pp. 657–665, 1994.

HUANG, G., GRANO, S. Galvanic interaction between grinding media and arsenopyrite and its effect on flotation: part i. Quantifying galvanic interaction during grinding. **Int. J. Miner. Process.** 78, pp. 182–197, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Informações sobre a economia mineral brasileira 2023** – ano base 2022. 1.ed. Brasília: IBRAM, 2023.

JOHANSSON, G., PUGH, R.J. The influence of particle size and hydrophobicity on the stability of mineralized froths. **Int. J. Miner. Process.** 34, pp. 1–21, 1992.

KITCHENER, J.A. Surface forces in flotation – a critique. In: Jones, M.H., Woodcock, J.T. (eds.), principles of mineral flotation: **The Wark Symposium**. The Australian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 65–71, 1984.

KOH, P.T.L., HAO, F.P., SMITH, L.K., CHAU, T.T., BRUCKARD, W.J. The effect of particle shape and hydrophobicity in flotation. **Int. J. Miner. Process.** 93, pp. 128–134, 2009.

KURNIAWAN, A.U., OZDEMIR, O., NGUYEN, A.V., OFORI, P., FIRTH, B.. Flotation of coal particles in MgCl₂, NaCl, and NaClO₃ solutions in the absence and presence of Dowfroth 250. **Int. J. Miner. Process.** 98, pp. 137–144, 2011.

LAI, R.W.M., STONE, L.C., RIMMASCH, B.E. Effect of humus organics on the flotation recovery of molybdenite. **Int. J. Miner. Process.** 12, pp. 163–172, 1984.

LELIS, D. F. **Influência de cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e Mn^{2+} na flotação reversa de minério de ferro.** 88 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mineral) –Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

LEVAY, G., SCHUMANN, R.A system approach to water quality management in the minerals processing industry, water in mining. **The australasian institute of mining and metallurgy**, pp. 277–287, 2006.

LEVAY, G., SMART, R.S.C., SKINNER, W.M.The impact of water quality on flotation performance.**J. S. Afr. Inst. Min. Metall.** 101, pp. 69–76, 2001.

LIU, W., MORAN, C.J., VINK, S. A review of the effect of water quality on flotation.**Minerals engineering**, v. 53, pp. 91-100, 2013

LOPES, G. M. **Flotação direta de minério de ferro.** 176 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. **Tratamento de Minérios.**2010. 5.ed. Rio de janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.

BAIRD, R., & BRIDGEWATER, L. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.**2017. 23rd ed. Washington, D.C., American Public Health Association.

LUZ, A.B., SAMPAIO J. A., ALMEIDA, S.L.M. **Introdução ao tratamento de minérios.** 1ª. Edição . Rio de janeiro: Editora do centro de tecnologia mineral, 2004.

MAMEDE, C. R. S.; GALERY, R.; PERES, A. E. C. Flotação catiônica reversa de minério de ferro na presença de cátions Ca^{2+} .**Associação brasileira de metalurgia, materiais e mineração**, v. 13, n. 2, pp. 181-187, 2016.

MENDONÇA, A. M.; RABELO, L. F.; ROSA, M. A. N.; FONSECA, R. A.; MACHADO, L.C.R. Influência da qualidade de água de processo na flotação da mina de sossego. In: **XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, Organização. Proceedings do XL Encontro Nacional de Tratamento de Minérios; pp. 340-347, 2011.

MOOLMAN, D.W., EKSTEEN, J.J., ALDRICH, C., VAN DEVENTER, J.S.J. The significance of flotation froth appearance for machine vision control. **Int. J. Miner. Process.**48, pp.135–158, 1996.

NEDVED, M., JANSZ, J. Waste water pollution control in the Australian mining industry. **J. Clean. Prod.** 14, pp. 1118–1120, 2006.

PETERS, N.E., MEYBECK, M. Water quality degradation effects on freshwater availability: impacts of human activities. **Water int.** 25, pp. 185–193, 2000.

PORTAL CLIMATEMPO. **Climatologia em Conceição do Mato Dentro**, BR, 2024. Disponível em:

<https://www.climatempo.com.br/climatologia/4153/conceicaodomatodentro-mg>

PUGH, R.J., WEISSENBORN, P., PAULSON, O. Flotation in inorganic electrolytes; the relationship between recover of hydrophobic particles, surface tension, bubble coalescence and gas solubility. **Int. J. Miner. Process.** 51, pp. 125–138, 1997.

RABOCKAI, T. **Físico-química de superfícies**. New York:plenum press, 1979.

RAO, S.R., ESPINOSA-GOMEZ, R., FINCH, J.A., BISS, R. Effects of water chemistry on the flotation of pyrochlore and silicate minerals. **Miner. Eng.** 1, pp. 189–202, 1988.

RAO, S.R., FINCH, J.A. A review of water re-use in flotation. **Miner. Eng.** 2, pp. 65–85, 1989.

ROCHA, G. M. ET AL. Caracterização tecnológica e avaliação de depressores na flotação de rejeito de minério de ferro. **Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração**, v. 16, n. 1, pp. 68-74, 2019.

ROSIÈRE, C. A. A recristalização do minério de ferro da jazida do pico do itabirito no quadrilátero ferrífero e suas implicações genéticas. In: **Simpósio de Geologia de Minas Gerais**, 1983, Belo Horizonte. Boletim da sbg - núcleo minas gerais. Belo horizonte, V. 3, pp. 173-186, 1983.

SANTOS, A. S. P.; GONÇALVES, R. F.; MELO, M. C.; LIMA, M. A. M.; ARAUJO, B. M. Uma análise crítica sobre os padrões de qualidade de água de uso e de reuso no Brasil. **Revista Sustinere**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 2, pp. 437-462, 2020.

SANTOS, A.L.A., MAYRINK R.I.F.F., NIGRI, E.M., ROCHA, S.D.F. Electrokinetic study of pyrochlore in the presence of calcium and magnesium electrolytes in the context of water reuse, **Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects**, VOLUME 684, 2024,

SCHUMANN, R., LEVAY, G., AMETOV, I. The impact of recycling on process water quality in mineral processing, water in mining. **The Australasian Institute of Mining and Metallurgy**, Perth, Western Australia, pp. 79–86, 2009.

SCHWARZ, S., GRANO, S. Effect of particle hydrophobicity on particle and water transport across a flotation froth. **Colloids surf. A** 256, 157–164, 2005.

SENIOR, G.D., TRAHAR, W.J. The influence of metal hydroxides and collector on the flotation of chalcopyrite. In. **J. Miner. Process.** 33, pp. 321–341, 1991.

SHACKLETON, N.J., MALYSIAK, V., O'CONNOR, C.T. The use of amine complexes in managing inadvertent activation of pyroxene in a pentlandite–pyroxene flotation system. **Miner. Eng.** 16, pp. 849–856, 2003.

SLATTER, K.A., PLINT, N.D., COLE, M. Water management in anglo platinum process operations: effects of water quality on process operations., In: **The International Mine Water Conference**, pp. 46–55, 2009.

STAPELFELDT, F., LIMA, R.M.F. Recycling of process water containing amines in the reverse flotation of iron ores. **The international mine water associations symposium**, Belo Horizonte, Brazil, pp. 1–10, 2001.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters**, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 1022, 1996.

TARPANI, R. R. Z.; **Remoção de alumínio monomérico de água para abastecimento através da ação da carboximetilcelulose e da quitina**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

TURRER, H. D. G.; FRANÇA, J. R. O.; NASCIMENTO, C. M.; CASTRO, E. F.; RUSSO, J. F. C.; SALAZAR, J. S.; BARRIOS, G. K. P.; TAVARES, L. M.; LICHTER, J. Comportamento de diferentes minérios do Minas-Rio na cominuição. **19º Simpósio de Mineração**, São Paulo: ABM week, 2018.

VIEIRA, A. M. **Flotação – alguns tópicos**. Samarco, 1995.

WESLER, S.; BRIDA, I. C.; GEREMIAS, R.; MENEZES, C. T. B.; VASQUEZ, T. P.; Estudo do potencial de adsorção de íons de ferro de água contaminada com drenagem ácida de mina utilizando geopolímero à base de cinza da casca de arroz e resíduo cerâmico, **Eng sanit ambient**, v.26 n.6, pp. 1123-1133, 2001.

8. APÊNDICE - Metodologia dos testes de flotação

Ensaios de flotação em bancada foram conduzidos para obter a recuperação de massa, a recuperação metálica, os teores de contaminantes como SiO₂, Al₂O₃ no concentrado. O procedimento utilizado nos testes de flotação convencional foi o seguinte:

Para cada dia de teste foram seguidos os seguintes passos:

- Foram preparados 20 litros de água deionizada com pH 10,5, regulado com solução de hidróxido de sódio a 10 % e 10L de cada uma das águas a serem estudadas.

As dosagens utilizadas foram de 1450 g/t Fe de amido (solução estoque de amido a 3%) e 150g/ton de amina (solução estoque de amina a 1%).

O procedimento de preparação da solução estoque de amido é descrito a seguir.

- Preparar uma solução de amido a 3%. Para isso, deve-se seguir o procedimento descrito a seguir;
- Pesquisar 15 g de amido em um béquer de vidro ou plástico com capacidade preferencialmente de 50 ml em balança semi-analítica;
- Pesquisar 6 g de solução de hidróxido de sódio (soda) a 50% em um béquer de vidro ou plástico com capacidade de 50 ml em balança semi-analítica;
- Pesquisar 497g de água deionizada em um béquer de plástico com capacidade para 500 ml em balança semi-analítica;
- Após a transferência do amido para um béquer vazio de 500 ml, adicionar aproximadamente 50 g de água deionizada já pesada anteriormente, para a hidratação do amido por um tempo aproximado de 5 min;
- Após a hidratação do amido, adicionar solução de NaOH a 50%, com o auxílio de um bastão de vidro ou no agitador automático de reagentes e obter a sua gelatinização;
- Após a gelatinização, adicionar o restante da água deionizada, durante o período de trabalho, e manter sob agitação constante até o fim das atividades.

A validade da solução é de 1 dia. O procedimento de preparação da solução de amina está descrito a seguir.

- Pesar 1g de amina em balança analítica em um béquer de vidro ou plástico com capacidade preferencialmente de 200 ml;
- Pesar 99 ml de água deionizada em um béquer de vidro ou plástico com capacidade preferencialmente de 200ml;
- Após acrescentar a água no béquer contendo a amina colocar a solução no agitador magnético. A validade desta solução é de 1 dia.

Os ensaios de flotação foram realizados em célula marca modelo, inicialmente foi adicionada água com pH natural na cuba para atingir 60% de porcentagem de sólidos – condicionamento, posteriormente a massa de minério adequada foi adicionada à cuba e agitação mantida em 350 RPM. O pH natural foi medido e adicionado o amido, realizando o condicionamento com o minério por 5 minutos.

- A agitação da polpa na etapa de condicionamento foi ajustada para 1500 RPM e após 5 minutos, o pH foi ajustado para 10,5 com solução de NaOH;
- Foi adicionada a amina 7500 e após um minuto de condicionamento completou-se o volume da cuba com água deionizada ou de processo, com a polpa em agitação de 1300 RPM;
- Iniciou-se o borbulhamento de ar uma vazão de 2,5 L/min;
- Foi iniciada a flotação e coletado o flotado, desligado o sistema de ar, os raspadores e o motor (e anotado o pH final da polpa e o tempo de da flotação);
- As polpas foram filtradas e secas em estufa, e pesadas e preparadas análises químicas.

Testes de cinética de flotação

O ensaio cinético da flotação foi realizado seguindo o mesmo procedimento da flotação normal até a exaustão, porém flotados foram retiradas nos tempos de 30, 60, 120, 180 e 300 segundos após o início da flotação.