



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBA PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS  
HÍDRICOS



**ESTUDO DE PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DE CLORETO FÉRRICO  
OBTIDO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO NO  
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

**Athos Moisés Lopes Silva**

ITAJUBÁ  
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO  
AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**Athos Moisés Lopes Silva**

**Estudo de Produção e Aplicação de Cloreto Férrico obtido de rejeito  
de mineração de ferro no tratamento de esgotos sanitários**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

**Área de Concentração:** Meio Ambiente e Recursos Hídricos

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Herlane Costa Calheiros

ITAJUBÁ  
2019



Ministério da Educação  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

**ANEXO I**  
**FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Título da Dissertação:** "ESTUDO DA PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DE CLORETO FÉRRICO OBTIDO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO"

**Autor(a):** Athos Moises Lopes Silva

**AVALIADORES(AS)**

Examinadores(as)	CONCEITO		Rubrica
	"A" = Aprovado	"R" = Reprovado	
2ª	A		
3ª	A		

**Observações:**

- (1) O trabalho será considerado aprovado se todos os examinadores atribuírem conceito "A";
  - (2) O Trabalho será considerado reprovado se forem atribuídos pelo menos 2 (dois) conceitos "R";
  - (3) O trabalho será considerado insuficiente se for atribuído um único conceito "R".
- Nesse caso, a Comissão Examinadora deve definir como avaliar a nova versão da dissertação, o que deverá ser feito num período máximo de 3 (três) meses.

**Resultado Final:** A  
\* Responder com "A", "R" ou "I".

**Conceito:** APROVADO  
\* Responder com "Aprovado", "Reprovado" ou "Insuficiente".

**Observações:** \_\_\_\_\_

Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Itajubá, 03 de julho de 2019.

**Prof.ª Dr.ª Milady Renata Apolinário da Silva**  
2ª Examinadora - UNIFEI

**Prof.ª Dr.ª Herlane Costa Calheiros**  
3ª Examinadora (Orientadora) - UNIFEI



Scanned with  
CamScanner

*O maior trem do mundo  
Leva minha terra  
Para a Alemanha  
Leva minha terra  
Para o Canadá  
Leva minha terra  
Para o Japão*

*O maior trem do mundo  
Puxado por cinco locomotivas a óleo diesel  
Engatadas geminadas desembestadas  
Leva meu tempo, minha infância, minha vida  
Triturada em 163 vagões de minério e destruição*

*O maior trem do mundo  
Transporta a coisa mínima do mundo  
Meu coração itabirano*

*Lá vai o trem maior do mundo  
Vai serpenteando, vai sumindo  
E um dia, eu sei não voltará  
Pois nem terra nem coração existem mais.*

*O maior trem do mundo*  
(Carlos Drummond de Andrade - Jornal "O Cometa Itabirano", n. 69, ago/1984)

## **DEDICATÓRIA**

A meus pais Geraldo Moisés e Maria Lúcia.

Às vítimas dos rompimentos das barragens de Mariana e Brumadinho.

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora professora Dr.<sup>a</sup> Herlane Costa Calheiros pela confiança depositada e conhecimento compartilhado.

Aos professores Dr.<sup>a</sup> Maria Cláudia Botan e Dr. Paulo de Castro Vieira (UFOP) pelas sugestões feitas na banca examinadora do exame de qualificação, que contribuíram para melhoria do presente trabalho.

À professora Dr.<sup>a</sup> Ana Lúcia Fonseca e Técnicos Elaine Dias de Faria, João Victor Rocha, Osvaldo de Melo (Osvaldinho), Fabiano Nazário e Jonas Mendes pelas sugestões e conhecimento compartilhado na execução de testes nos Laboratórios: Limnologia, Físico Químico, Estruturas e Caracterização Estrutural da UNIFEI.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, representados pelas professoras e Dr.<sup>a</sup> Fabrina Bolzan Martins e Dr.<sup>a</sup> Daniela Rocha Teixeira.

À Direção do Instituto de Recursos Naturais representado pelo professor Dr. Marcelo de Paula Corrêa.

Aos amigos do Instituto de Recursos Naturais Osvaldinho, Haroldo, Fabiano, João Victor, Tiago, Jô, Xandinho, André, Paulo, Elaine, Tamara, Amarildo e Yone pelo apoio, amizade e momentos compartilhados.

À Universidade Federal de Itajubá por ter tornado possível o meu acesso à universidade pública e por fazer parte da minha formação profissional.

## RESUMO

O *Chemically Enhanced Primary Treatment* (CEPT) pode ser empregado como opção de tratamento físico e/ou químico primário para remoção prévia de compostos indesejáveis em diversas tipologias de tratamento de efluentes. Geralmente, usa-se como agente coagulante neste tratamento, soluções a base de Sulfato de Alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) e o Cloreto Férrico ( $FeCl_3$ ). Na maioria dos casos, a implantação de um tratamento químico pode se tornar inviável, pois o uso dos agentes coagulantes representa altos custos em sua operação e por isso, devem ser considerados o desenvolvimento de novos produtos químicos ou formas alternativas de obtenção dos coagulantes já consolidados no CEPT. A principal forma de obtenção do  $FeCl_3$  se dá através da reação do Óxido de Ferro ( $Fe_2O_3$ ) presente na Hematita (Minério de Ferro) e Ácido Clorídrico (HCl). Um dos subprodutos da Mineração de Ferro é o Rejeito (RMF), resíduos constituídos de sólidos descartados no processo de beneficiamento do minério, mas estes resíduos ainda possuem concentrações de  $Fe_2O_3$  de até 60% em massa. Sendo assim, este trabalho buscou avaliar a produção de  $FeCl_3$  por meio do rejeito da mineração e a aplicação deste coagulante em tratamento CEPT de bancada utilizando esgotos sanitários. Com base nos resultados dos testes, observou-se que é possível gerar  $FeCl_3$  a partir do RMF com qualidade similar ao produto comercial. Quanto a aplicação do  $FeCl_3$ /RMF em tratamento CEPT de bancada pode-se observar que a aplicação das dosagens acima de 100 mg/L e 150 mg/L obtiveram as eficiências de remoção de parâmetros importantes como DQO (Demanda Química de Oxigênio) e Fósforo Total do efluente, próximas ao  $FeCl_3$  Comercial. Diante deste estudo observou-se que o RMF pode ser usado como insumo para geração de  $FeCl_3$  a ser utilizado em tratamento de efluentes e recomenda-se para trabalhos futuros, a análise da viabilidade econômica de sua produção em larga escala.

Palavras chave: Coagulação e Floculação; Cloreto Férrico; Precipitação Química; Tratamento de Águas Residuárias.

## ABSTRACT

Chemically Enhanced Primary Treatment (CEPT) can be used as a primary physical and chemical treatment option for the primary removal of undesirable compounds in various types of effluent treatment. Generally, the Ferric Chloride ( $\text{FeCl}_3$ ) is used as the coagulant in this treatment. In most cases, the implantation of a chemical treatment may become impracticable, since the use of coagulant agents represents high costs in its operation and for that reason, the development of new chemical products or alternative forms of obtaining already consolidated coagulants must be considered in CEPT. The main way of obtaining  $\text{FeCl}_3$  is through the reaction of Iron Oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) present in Hematite (Iron Ore) and Hydrochloric Acid (HCl). One of the by-products of Iron Mining is Reject, residues constituted of solids discarded in the ore beneficiation process, but these residues still have a high concentration of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Thus, this work sought to evaluate the production of  $\text{FeCl}_3$  through the mining tailings and the application of this coagulant in CEPT bench treatment using sanitary sewage. Based on the results of the tests, it was observed that it is possible to generate  $\text{FeCl}_3$  from RMF with similar quality to the commercial product. Regarding the application of  $\text{FeCl}_3$  / RMF in CEPT bench treatment, it can be observed that the application of dosages above 100 mg/L and 150 mg/L obtained the removal efficiencies of important parameters such as COD (Chemical Oxygen Demand) and Phosphorus Total effluent, close to commercial  $\text{FeCl}_3$ . In view of this study, it was observed that RMF can be used as input for the production of  $\text{FeCl}_3$  to be used in effluent treatment.

Keywords: Coagulation and Flocculation; Ferric Chloride; Chemical Precipitation; Treatment of Wastewater.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
APAM	Poliacrilamida aniônica
C	Carbono
Ca	Cálcio
CDV1	Caixa Divisora de Vazão 1
CEPT	<i>Chemically Enhanced Primary Treatment</i>
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
DA	Digestão Anaeróbia
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DPC	Decantação Primária Convencional
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
FBP	Filtro Biológico Percolador
Fe	Ferro
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IFS	Instituto Federal do Sul de Minas
LA	Lodos Ativados
LOC	Licença de Operação Corretiva
MBR	<i>Membrane Bio Reactor</i>
MEV	Microscopia Eletrônica por Varredura
MG	Minas Gerais
N	Nitrogênio
Na	Sódio
NBR	Norma Brasileira
O	Oxigênio
P	Fósforo
P <sub>Total</sub>	Fósforo Total
PIB	Produto Interno Bruto

PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
RMF	Rejeito da Mineração de Ferro
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
S <sub>sed</sub>	Sólidos Sedimentáveis
SST	Sólidos Suspensos Totais
TAS	Taxa de Aplicação Superficial
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
TQPA	Tratamento Químico Primário Avançado

## LISTA DE UNIDADES

%	Percentual
(Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	Sulfato de Alumínio
CH <sub>4</sub>	Metano
FeCl <sub>3</sub>	Cloreto Férrico
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro
g	grama
g/L	gramas por Litro
HCl	Ácido Clorídrico
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de Hidrogênio
mg/L	miligramas por litro
mol/L	mol por Litro
m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /dia	Metro cúbico por metro quadrado por dia
nm	nanômetro
PPM	Partículas por milhão

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Desenho esquemático do [1] Tratamento CEPT como Tratamento individualizado e [2] como tratamento complementar. ....	22
<b>Figura 2</b> - Diagrama de estabilidade de Ferro em meio aquoso. ....	34
<b>Figura 3</b> - Esquema de produção de $\text{FeCl}_3$ em escala industrial.....	35
<b>Figura 4</b> - Esquema da metodologia empregada no trabalho .....	39
<b>Figura 5</b> - Sistemas de barragens localizados no município de Itabira: (A) Sistema Conceição, (B) Sistema Conceição II, (C) Sistema Pontal e (D) Sistema Pontal. ....	41
<b>Figura 6</b> - (1) Localização do município de Itabira no Estado de Minas Gerais (Wikipédia, 2018), (2) – Imagem de satélite do ponto de coleta (Google, 2018), (3) – Ponto de Coleta à jusante da Barragem da Conceição.....	41
<b>Figura 7</b> - (A) Concentrações de $\text{FeCl}_3$ analítico padrão em ácido salicílico e (B) curva de calibração gerada em espectrofotômetro. ....	44
<b>Figura 8</b> - <i>Jar Test</i> utilizado no experimento.....	46
<b>Figura 9</b> - Ponto de coleta de efluente - CDV1 – ETE Itajubá – MG .....	47
<b>Figura 10</b> - Microcústáceo <i>Daphinea magna</i> – imagem de em lupa analítica.....	50
<b>Figura 11</b> - Separação granulométrica do rejeito da mineração de Ferro.....	52
<b>Figura 12</b> - Gráficos de composição das 4 amostras do RMF obtidas a partir da análise em MEV. ....	53

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Desempenho estimado de DPC e CEPT.....	21
<b>Tabela 2</b> - Principais coagulantes utilizados no CEPT e seu princípio .....	27
<b>Tabela 3</b> - Testes utilizando Sulfato de Alumínio, PAC e Cloreto Férrico em tratamento CEPT na cidade de Avellino, Itália. ....	28
<b>Tabela 4</b> - Relação Molar entre Fe e P .....	31
<b>Tabela 5</b> - Principais tecnologias de remoção de P .....	32
<b>Tabela 6</b> - Análises de caracterização das amostras de Rejeito da Mineração de Ferro .....	42
<b>Tabela 7</b> - Soluções de ácidos de HCl utilizadas na produção de FeCl <sub>3</sub> .....	43
<b>Tabela 8</b> - Parâmetros operacionais aplicados ao Jar <i>Test</i> .....	46
<b>Tabela 9</b> - Ensaio de coagulação e floculação utilizando FeCl <sub>3</sub> /Comercial .....	47
<b>Tabela 10</b> - Parâmetros físico químicos a serem analisados.....	48
<b>Tabela 11</b> - Caracterização Físico-química do RMF.....	51
<b>Tabela 12</b> - Distribuição granulométrica das amostras do RMF .....	52
<b>Tabela 13</b> - Composição química do RMF obtida por meio de análise MEV.....	54
<b>Tabela 14</b> - Volume de FeCl <sub>3</sub> /RMF e peso final de RMF após a reação.....	55
<b>Tabela 15</b> - Concentrações de FeCl <sub>3</sub> obtidas a partir do RMF .....	55
<b>Tabela 16</b> - Concentrações de FeCl <sub>3</sub> obtidas a partir de diferentes granulometrias e solução de HCl a 100% .....	56
<b>Tabela 17</b> - pH do efluente bruto utilizado no tratamento CEPT .....	57
<b>Tabela 18</b> - pH do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl <sub>3</sub> Comercial .....	58
<b>Tabela 19</b> - pH do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl <sub>3</sub> /RMF .....	59
<b>Tabela 20</b> - Turbidez do efluente bruto utilizado no tratamento CEPT .....	60
<b>Tabela 21</b> - Turbidez do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl <sub>3</sub> /Comercial.....	61
<b>Tabela 22</b> - Turbidez do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl <sub>3</sub> /RMF.....	62
<b>Tabela 23</b> - Sólidos Sedimentáveis do efluente bruto utilizado no tratamento CEPT .....	63
<b>Tabela 24</b> - Ssed do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl <sub>3</sub> Comercial.....	64
<b>Tabela 25</b> - Ssed do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl <sub>3</sub> /RMF.....	65
<b>Tabela 26</b> - DQO do efluente bruto utilizado no tratamento CEPT .....	66
<b>Tabela 27</b> - DQO do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl <sub>3</sub> Comercial.....	67
<b>Tabela 28</b> - DQO do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl <sub>3</sub> /RMF.....	67

<b>Tabela 29</b> - Ptotal do efluente bruto utilizado no tratamento CEPT.....	69
<b>Tabela 30</b> - Ptotal do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl <sub>3</sub> Comercial.....	69
<b>Tabela 31</b> - Ptotal do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl <sub>3</sub> RMF .....	70
<b>Tabela 32</b> - Contagem de letalidade resultado da CE50.....	72

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> - Gráfico do pH do efluente após tratamento CEPT utilizando o $\text{FeCl}_3$ / Comercial e o $\text{FeCl}_3$ / RMF.....	60
<b>Gráfico 2</b> - Turbidez do efluente após tratamento CEPT utilizando o $\text{FeCl}_3$ / Comercial e o $\text{FeCl}_3$ / RMF .....	63
<b>Gráfico 3</b> - Produção de SSed do efluente após tratamento CEPT utilizando o $\text{FeCl}_3$ / Comercial e o $\text{FeCl}_3$ / RMF .....	65
<b>Gráfico 4</b> - Eficiência de remoção da DQO após tratamento CEPT utilizando o $\text{FeCl}_3$ / Comercial e o $\text{FeCl}_3$ / RMF .....	68
<b>Gráfico 5</b> - Eficiência de remoção de P total do efluente após tratamento CEPT utilizando o $\text{FeCl}_3$ / Comercial e o $\text{FeCl}_3$ / RMF.....	71

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	17
2.	OBJETIVOS .....	19
2.1.	Objetivo Geral .....	19
2.2.	Objetivos Específicos.....	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
3.1.	Tratamento CEPT .....	20
3.2.	Panorama da aplicação do Tratamento CEPT .....	23
3.3.	Uso de Coagulantes do Tratamento CEPT .....	24
3.4.	Uso do FeCl <sub>3</sub> em tratamento CEPT .....	30
3.5.	Obtenção do FeCl <sub>3</sub> por meio do óxidos de ferro .....	33
3.6.	Uso de RMFs como insumo para produção de FeCl <sub>3</sub> .....	35
4.	MATERIAL E MÉTODOS .....	38
4.1.	Método da pesquisa.....	38
4.2.	Amostragem e caracterização do rejeito da Mineração de Ferro .....	40
4.3.	Produção de Cloreto Férrico a partir do rejeito .....	43
4.4.	Análise da concentração do coagulante.....	44
4.5.	Simulações de tratamento CEPT em escala de bancada .....	45
4.6.	Análise da ecotoxicidade.....	48
4.7.	Tratamento estatístico dos dados.....	50
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	51
5.1.	Caracterização Física do RMF.....	51
5.2.	Caracterização Química do RMF .....	53
5.3.	Produção de Cloreto Férrico.....	54
5.4.	Ensaio CEPT de bancada.....	56
5.4.1.	pH e Alcalinidade .....	57

5.4.2. Turbidez residual .....	60
5.4.3. Produção de Sólidos Sedimentáveis.....	63
5.4.4. Remoção da DQO.....	66
5.4.5. Remoção da Ptotal.....	68
5.5. Análise de Ecotoxicidade .....	71
6. CONCLUSÃO .....	73
7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	75
REFERÊNCIAS .....	76
APÊNDICES.....	81

## 1. INTRODUÇÃO

As águas residuárias são o resultado dos diversos usos da água de abastecimento e em sua composição incluem matéria orgânica, sólidos, nutrientes e microrganismos que podem gerar problemas ambientais nos corpos receptores e acarretar diversas doenças de veiculação hídrica na população, sendo então necessário seu tratamento e disposição adequada.

Segundo dados do Sistema Nacional de Saneamento (SNIS) no Brasil, o tratamento e disposição final das águas residuárias geradas nas cidades e nas indústrias ainda é inexistente (Brasil, 2017) e considerando essa problemática, a implantação de Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) torna-se uma necessidade fundamental para a promoção da saúde pública e bem-estar ambiental. Entretanto, é necessário que se busque aprimoramento dos sistemas existentes a fim de depreciar os custos e otimizar a estabilização de parâmetros importantes como a DQO (Demanda Química de Oxigênio), nutrientes como Nitrogênio (N) e Fósforo (P), óleos e graxas e também, sólidos presentes nas águas residuárias.

Atualmente, existem diversas tecnologias de tratamento para as águas residuárias podendo citar como exemplo os sistemas biológicos aeróbios (Lodos Ativados e Filtros Biológicos Percoladores) e os sistemas biológicos anaeróbios (Reatores UASB e Filtros Anaeróbios) e os sistemas físico-químicos (Decantadores Primários ou Secundários e Flotação por ar Dissolvido). Em algumas das tipologias existentes, se faz necessário o emprego de tratamento físico e/ou químico primário a fim de promover a remoção prévia de matéria orgânica, sólidos e outros compostos indesejáveis. Neste contexto destaca-se o *Chemically Enhanced Primary Treatment* (CEPT), conhecido também como Tratamento Primário Quimicamente Assistido (TPQA).

O CEPT se baseia na remoção de sólidos em suspensão na água residuária através de processos físico-químicos de coagulação, floculação e sedimentação. Este processo promove elevadas eficiências de remoção da Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólido e Fósforo e, geralmente, usa-se como agente coagulante produtos como o Cloreto Férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) ou o Sulfato de Alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ).

Na maioria dos casos, a implantação de um tratamento químico primário pode se tornar insustentável para as condições de países em desenvolvimento como o Brasil, pois o uso dos agentes coagulantes representa altos custos de operação nas ETEs. Desta forma, o desenvolvimento de novos produtos químicos ou formas alternativas de obtenção dos coagulantes já consolidados no CEPT deve ser considerado. A principal forma de obtenção do

$\text{FeCl}_3$  se dá através da reação do Óxido de Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) presente na Hematita (Minério de Ferro) e Ácido Clorídrico (HCl).

Um dos subprodutos da Mineração de Ferro é o Rejeito. De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2016), esse subproduto, de modo geral, é constituído de resíduos sólidos da extração (denominado estéril) e do beneficiamento do minério (os rejeitos), são gerados grandes volumes e, de modo geral, são dispostos em grandes barragens.

Porém, de acordo com estudos desenvolvidos por Martini et al. (2016) e Gomes, Pereira e Peres (2011), os rejeitos da mineração possuem grande concentração de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em torno de 40-60% em massa, o que possibilita seu uso como matéria prima para a produção de  $\text{FeCl}_3$ . Destaca-se ainda que os Rejeitos da Mineração de Ferro (RMF) e sua disposição em barragens podem gerar impactos ambientais de grandes dimensões como ocorrido no município de Mariana em Novembro de 2015 e em Brumadinho em Janeiro de 2019, ambos no estado de Minas Gerais. Assim, devido ao ocorrido, há grande impulsão no que concerne a estudos que vislumbrem o aproveitamento dos rejeitos de mineração com finalidade de se obter subprodutos do mesmo. Uma vez que isto seja viável, a aplicação em larga escala na produção de  $\text{FeCl}_3$  por meio do RMF pode representar um grande ganho técnico, bem como contribuir com alternativas para viabilizar o tratamento de esgotos sanitários no país, principalmente em áreas mineradoras de minério de ferro.

Políticas públicas podem e devem ser desenvolvidas no sentido de garantir o acesso universal desse serviço a todos os cidadãos. E nesse sentido, destaca-se também o impacto social que este estudo pode causar, mediante a sua viabilidade, pois pode gerar um insumo acessível e em grande quantidade para otimizar o tratamento de efluentes urbanos, impactando na gestão de resíduos de mineração e gerando, portanto, duplo ganho à sociedade.

Sendo assim com este estudo buscou-se analisar a produção de  $\text{FeCl}_3$  a partir do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ainda presente no rejeito da Mineração de Ferro e seu posterior uso em tratamento CEPT de esgotos sanitários.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo Geral

Estudar a produção do Cloreto Férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) gerado a partir do Rejeito de Mineração de Ferro e sua aplicação no *Chemically Enhanced Primary Treatment* (CEPT) de esgoto sanitário.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a produção do  $\text{FeCl}_3$  gerado a partir do rejeito da mineração de Ferro (RMF);
- Avaliar a remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Fósforo Total ( $\text{P}_{\text{total}}$ ), Turbidez, e também analisar a produção de Sólidos Sedimentáveis ( $\text{S}_{\text{sed}}$ ) nos esgotos sanitários a partir da utilização do  $\text{FeCl}_3$  gerado por meio do RMF no tratamento CEPT de esgotos sanitários;
- Realizar testes de ecotoxicidade por meio de microcrustáceos *Daphinea magna* do efluente final do tratamento CEPT utilizando o  $\text{FeCl}_3$  gerado a partir do RMF para analisar a possível geração de algum elemento prejudicial aos organismos aquáticos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Tratamento CEPT

O Tratamento CEPT é uma das estratégias mais eficazes e simples para depurar as águas residuárias, podendo ser aplicada ao início, ao meio ou ao final do tratamento do efluente. Pode-se citar que o CEPT pode ser adotado para atender distintos objetivos como melhoria no desempenho de Decantadores Primários Convencionais (DPC) ou Decantadores Secundários (DS), permite ampliação da capacidade das ETEs, pode apresentar-se como solução temporária em caso de variações de vazões afluentes à ETE decorrentes de população flutuante contribuinte, requer baixo custo inicial de investimento e permite, sob dosagens adequadas, a remoção de fósforo por precipitação (METCALF & EDDY, 2016; FIGUEIREDO, 2009; JORDÃO E PESSOA, 2014).

Conforme Jordão e Figueiredo (2009), o CEPT consiste em técnicas de retirada de sólidos em suspensão, matéria orgânica e outros compostos mediante a ação físico-química de processos avançados de sedimentação e decantação. Em essência, objetiva-se com a aplicação desta técnica, a remoção de matéria orgânica por meio da estabilização da DQO, fósforo e sólidos de efluentes a serem tratados em unidades de tratamento de esgotos. Pode-se citar como principais vantagens deste tratamento, a boa remoção de contaminantes importantes associado aos baixos custos de implantação (METCALF & EDDY, 2016). Associado às vantagens citadas, o CEPT tem sido utilizado comumente como alternativa capaz de minimizar os efeitos da variação da qualidade e vazão dos esgotos domésticos afluentes à ETE, requerendo para tanto menores custos de investimento (WANG *et al.*, 2009).

De modo geral, o CEPT apresenta desempenho superior ao DPC e similar á tratamentos biológicos como os reatores *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) na remoção de matéria orgânica e sólidos. O CEPT destaca-se também pela eficácia na remoção de Fósforo, equiparada apenas aos processos biológicos adaptados para essa função (WANG *et al.*, 2009).

Sendo esta técnica associada a tratamentos primários, é apresentado a seguir na Tabela 1, faixa de remoção de contaminantes estimados na aplicação do CEPT comparados ao

desempenho de tratamento primário convencional aplicado nas ETEs.

**Tabela 1** - Desempenho estimado de DPC e CEPT

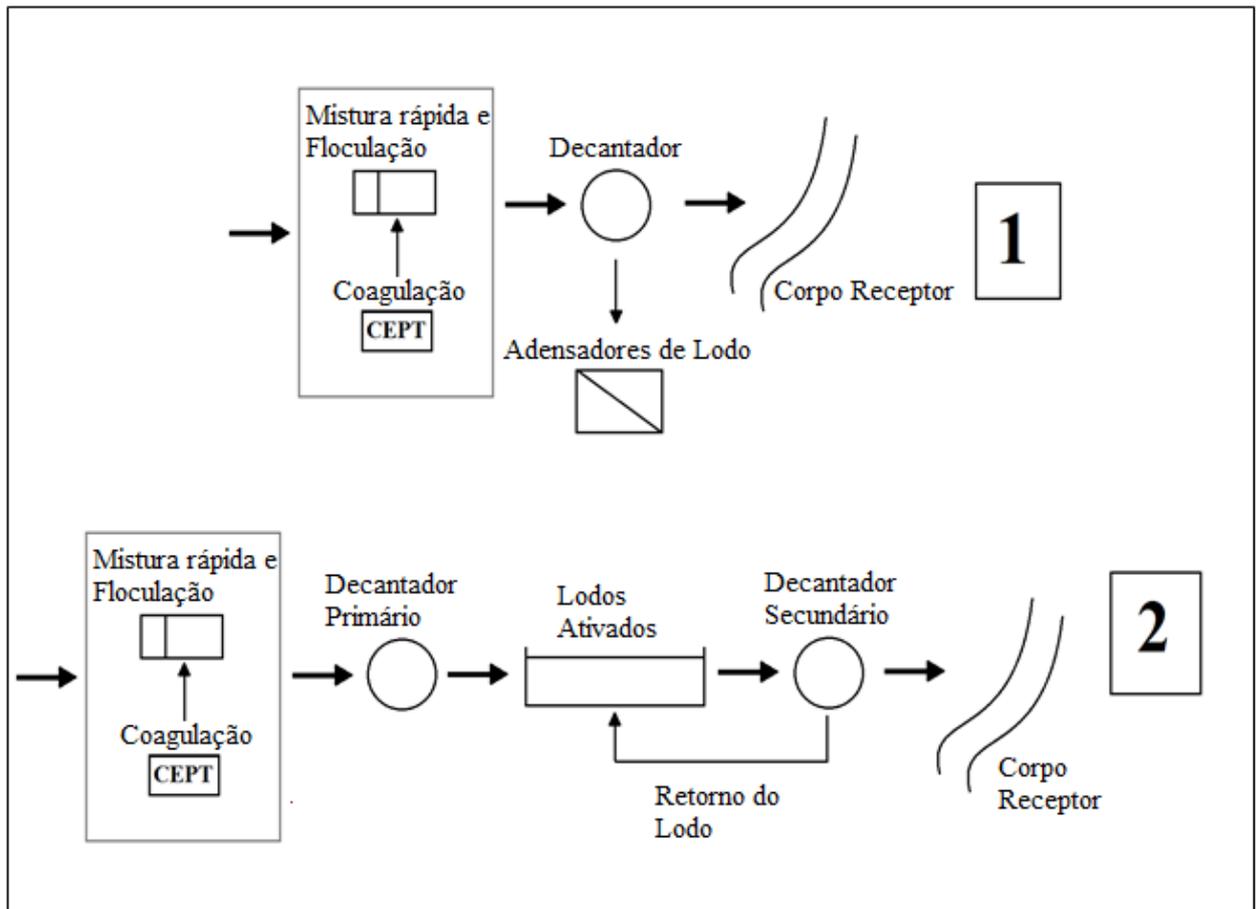
Eficiência média de remoção esperada	Sistema de Tratamento	
	DPC*	CEPT**
DBO <sub>5</sub> *** (%)	30-35	45-80
DQO <sup>+</sup> (%)	25-35	55-75
SST <sup>++</sup> (%)	55-65	45-80
Nitrogênio (NTK) <sup>+++</sup> (%)	<30	>30
Fósforo (%)	>35	55-75
Óleos e Graxas (%)	50	70-80

\* Decantador Primário Convencional  
 \*\* *Chemically Enhanced Primary Treatment*  
 \*\*\* *Demanda Bioquímica de Oxigênio*  
 + Demanda Química de Oxigênio  
 ++ Sólidos Suspensas Totais

**Fonte:** Adaptado de von Sperling (2005) e Jordão e Pessoa (2014).

Conforme exposto na Tabela 1, o CEPT pode apresentar eficiência de remoção de até 80% de SST, 75% da DQO, 35% da DBO<sub>5</sub>, 80% de Óleos e Graxas, valores estes superiores aos atribuídos à DPC. Destaca-se também a eficiência de remoção de P<sub>(Total)</sub>, até 75%. Em estudos desenvolvidos por Yoshida (2005) alcançaram valores próximos a 95%, enquanto nos DPC limita-se a 35%. Porém, ainda que a eficiência de remoção de Nitrogênio seja superior (>30%), não é representativa quando comparada a tratamentos biológicos aptos a remover este nutriente (METCALF & EDDY, 2016).

Tendo em vista os aspectos relacionados à aplicação desta técnica, pode-se dizer que o CEPT apresenta estabilidade operacional principalmente quando o clima não favorece o tratamento biológico. Situação recorrente, por exemplo, em tratamentos anaeróbios (CHERNICHADO, 2006), também é capaz de agregar ao desempenho das unidades de tratamento a na remoção de fósforo e matéria orgânica. A operação de unidades de decantação atreladas do CEPT pode ocorrer sob Taxas de Aplicação Superficial (TAS) de até 100 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/dia, enquanto em DPC admite-se TAS compreendida entre 40 e 60 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/dia, dependendo do processo de tratamento secundário subsequente (WANG *et al.*, 2009). Na Figura 1, é apresentado dois fluxogramas de tratamento de efluentes onde se inserem esta técnica, sendo eles o Tratamento CEPT como Tratamento individualizado e como tratamento complementar:



**Figura 1** - Desenho esquemático do [1] Tratamento CEPT como Tratamento individualizado e [2] como tratamento complementar.

**Fonte:** Metcalf & Eddy (2016), *adaptado*; von Sperling (2005) *adaptado*.

A Figura 1, apresenta o fluxograma da aplicação do CEPT de forma individualizada e, neste caso, há a simples aplicação do coagulante associados às etapas de Coagulação e Floculação. Como pós-tratamento faz-se necessário uma unidade de decantação e posterior tratamento do lodo retido como por exemplo, em adensadores ou leitos de secagem. Como exposto no fluxograma (Figura 2), esta técnica pode apresenta-se também como tratamento complementar de Lodos Ativados a fim de reduzir a carga orgânica, sólidos e outros compostos afluentes (METCALF & EDDY, 2016).

Dong, Parker e Dagnew (2015) avaliaram o impacto do CEPT utilizando dosagem de  $\text{FeCl}_3$  como coagulante no desempenho de tratamento de efluentes domésticos por biorreatores por membrana (Membrane Bio Reactor – MBR). A adição de 26 mg/L de  $\text{FeCl}_3$  aumentou o desempenho do sistema de MBR estudado em relação às eficiências de remoção de DQO e  $\text{DBO}_5$ , mas não tiveram uma influência significativa nas eficiências de remoção de Nitrogênio (NTK) e Fósforo Total (P). Os testes demonstraram também que a adição de  $\text{FeCl}_3$  resultou em

uma camada incrustante mais espessa na membrana. Portanto, foi observado que o lodo incrustante é mais poroso e mais fácil de se descartar na rotina operacional. O estudo de recuperação da MBR aplicado na rotina operacional do sistema indicou que a dosagem de  $\text{FeCl}_3$  aumentou a eficiência do protocolo de limpeza operacional das incrustações. O superior desempenho da membrana durante a operação combinado com maior eficiência de limpeza pela dosagem de  $\text{FeCl}_3$  melhoraram significativamente a operação do sistema no tratamento do efluente.

Gong *et al.* (2017), investigaram o tratamento CEPT como opção de pré-tratamento de sistema anaeróbio (reatores UASB) tratando efluente de bovinocultura tendo em vista a alta carga orgânica deste tipo de efluente. Os resultados experimentais demonstram que o CEPT foi eficaz como pré-tratamento na remoção de DQO obtendo uma eficiência próxima de 60% e Fósforo Total de 99% com a aplicação de uma dosagem de 40 mg/L uma solução combinada de  $\text{FeCl}_3$  e poliacrilamida aniônica (APAM). Segundo os autores essas eficiências prévias foram capazes de aliviar o sistema subsequente melhorando a eficiência global do tratamento.

### **3.2. Panorama da aplicação do Tratamento CEPT**

Tendo em vista a autonomia em relação a grandes variações climáticas, o CEPT é bem difundido em estações de regiões de clima temperado e frio como o caso de muitos países europeus. Estudo desenvolvido por Odegaard (1992) registrou na Noruega 87 ETEs que utilizavam a tecnologia como unidade de tratamento com eficiências médias de remoção de 91% de SST, 81% da DBO, 73% da DQO e 94% de  $P_{\text{total}}$ . Ainda de acordo com eficiências expostas pelo autor, a remoção de Nitrogênio total não foi representativa (28%). Em adaptação realizada para implantação de unidade CEPT na ETE de Ravda na Bulgária, foi possível identificar o considerável ganho na remoção de SST, na faixa de 25%, entre a decantação primária convencional e o CEPT utilizando 40 mg/L de  $\text{FeCl}_3$  (NENOV, 1995). Verificou-se nesta ETE o melhor desempenho do tratamento secundário quando recebeu o efluente de CEPT. De acordo com Nenov (1995), esse resultado pode ser explicado pela elevada proporção de DBO solúvel presente em relação à fração particulada no esgoto após o CEPT.

É comum a aplicação desta técnica a fim de se viabilizar o reuso de efluentes em

países subdesenvolvidos. Na província de Zheijiang, na China, o efluente de 16 estações de tratamento é submetido ao CEPT a fim de garantir o controle biológico e viabiliza-lo como água de reuso para irrigação. Em todas as ETEs registra-se durante a operação valores inferiores a 1.250 NMP/100 mL (número mais provável para 100 mililitros) para coliformes fecais e inferiores a 1 ovo/L para helmintos. Destaca-se diante dos resultados o bom desempenho do CEPT na remoção de patogênicos (ZAO *et al.*, 2013).

No Brasil, o CEPT desponta como solução tecnológica aplicável para os casos de estações de tratamento de esgotos sujeitas às variações temporárias de vazão afluente, como é o caso da ETE de Riviera de São Lourenço, em localizada no litoral do estado de São Paulo. Essa estação opera com duas unidades CEPT precedendo as lagoas anaeróbias existentes. Após a instalação das unidades, aumentou-se a capacidade de tratamento da ETE existente em 250%, utilizando área de ampliação de forma reduzida e permitindo assim, que a estação seja capaz de receber vazões excedentes em épocas de grande fluxo de turistas na cidade (TSUKAMOTO, 2002). São registradas nesta estação eficiências de remoção compreendidas entre 80 e 95% de SST, 55% e 75% de DQO, 50% e 66% de DBO, e 82 e 87% de  $P_{total}$  (TSUKAMOTO, 2002).

A instalação do CEPT tem sido utilizada em muitos países como alternativa capaz de, em uma primeira fase, minimizar os efeitos da poluição das águas (FIGUEIREDO, 2011). Estudos preliminares requeridos pelo Banco Mundial analisaram a utilização do CEPT para o controle do aporte de Fósforo à Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro (FIGUEIREDO, 2011). A adoção de processos químicos associada a processos anaeróbios vem sendo aplicados em escala real, podendo-se citar as ETEs dos municípios paulistas de Campinas, Valinhos, Rio Claro e Barra Bonita (MARGUTTI, FILHO e PIVELLI, 2008).

Cabe dizer que a aplicação do CEPT pode ser empregada em diferentes etapas dos sistemas de tratamento de esgotos, sendo possível ocorrer a montante dos decantadores primários, a montante dos tanques de aeração ou dos decantadores secundários, ou como tratamento terciário, ou seja, a jusante do processo biológico aeróbio (METCALF & EDDY, 2016; MARGUTTI, FILHO e PIVELLI, 2008).

### **3.3. Uso de Coagulantes do Tratamento CEPT**

O tratamento é CEPT é um processo que é conhecido há mais de 100 anos. No entanto, a sua aplicação às águas residuais consolidou-se apenas nas últimas duas décadas,

com base no desenvolvimento tecnológico da coagulação (GONG *et al.*, 2017). Os coagulantes neste tratamento usados podem ser classificados como polieletrólitos (ou auxiliares de coagulação) e coagulantes metálicos, sendo os mais empregados os inorgânicos como sais de alumínio e ferro, sulfato de alumínio, cloreto e sulfato férrico (MAGNAN, 2010) e não menos importantes, mas menos utilizados devido ao custo, estão os coagulantes orgânicos com densidade de carga positiva (polímeros catiônicos).

A aplicação do CEPT em ETEs se baseia em conceitos já conhecidos de coagulação, floculação e sedimentação usuais, por exemplo, em Estações de Tratamento de Água (ETA) de ciclo completo, porém não é usual o emprego de uma unidade convencional de floculação. Neste caso, utilizam-se frequentemente as caixas de areia aeradas para a função adicional de promover a formação dos flocos (FIGUEIREDO, 2011; METCALF E EDDY, 2016).

A coagulação anula as forças de repulsão entre as partículas coloidais, por meio de mecanismos de ligação e adsorção na superfície da partícula coloidal, pela adição de agentes químicos, denominados de eletrólitos, (Di Bernardo, 2011). Segundo Silva (2009) o processo de coagulação é complexo, envolvendo muitas reações e transferências de massa. Geralmente é dividido em três etapas básicas: formação do coagulante, desestabilização da partícula e colisão interpartículas. Os dois primeiros ocorrem durante e imediatamente após a dispersão do coagulante químico, através da mistura rápida. A colisão interpartículas, que resulta na formação do floco, inicia-se na mistura rápida, mas ocorre predominantemente na etapa de floculação (DI BERNARDO, 2009 LIBÂNIO 2009). O propósito da floculação é a formação de agregados ou flocos de partículas finamente divididas provenientes do processo de coagulação. Estas podem ser eficientemente removidas em processos de separação subsequentes, como a sedimentação, flotação e filtração (METCALF & EDDY, 2016).

Segundo CARDOSO (2007), os termos coagulação e floculação são utilizados como sinônimos, uma vez que ambos significam o processo integral de aglomeração das partículas. Sendo a coagulação, o processo através do qual o agente coagulante adicionado à água, reduz as forças que tendem a manter separadas as superfícies em suspensão, e a floculação é a aglomeração dessas partículas por meio de transporte de fluido, formando partículas maiores que possam sedimentar. Partículas de menores dimensões (0,01 $\mu$ m a 1 $\mu$ m) são denominadas colóides, permanecendo longos períodos em suspensão. A remoção desses colóides ocorre pela adição dos coagulantes, que promovem a desestabilização dos mesmos (METCALF E EDDY, 2016).

A aplicação dos coagulantes químicos desempenha papel determinante no tratamento CEPT. De acordo com Conventya (2014), geralmente são empregados compostos de ferro ou

alumínio, que através da produção de hidróxidos gelatinosos, conseguem aglomerar as impurezas e produzir íons trivalentes de carga positiva apta a atrair e neutralizar as cargas negativas dos coloides.

A desestabilização das partículas coloidais através do emprego de coagulantes faz com que o crescimento da partícula ocorra em consequência das colisões entre elas (METCALF & EDDY, 2015), por isso, a função do coagulante é reduzir as forças atrativas da suspensão coloidal para que a barreira de energia diminua e permita que as partículas se associem.

A aplicação do coagulante no meio líquido deve ser feito de maneira ágil e em uma unidade de mistura rápida como, por exemplo, em zonas de turbulência de calhas *Parshall* ou unidades mecanizadas pois, possibilitam que cada litro do líquido receba a mesma quantidade do coagulante no menor tempo possível, uma vez que o reagente hidrolisa e começa a se polimerizar instantaneamente (DI BERNARDO e PAZ, 2008).

Os principais coagulantes utilizados em tratamento CEPT são os sais metálicos de Alumínio (Al) e Ferro (Fe). O emprego destes coagulantes se deve, principalmente, a sua disponibilidade e baixo custo (CONVENTYA, 2014). Porém, de acordo com Vaz *et al.* (2010), embora sejam muito utilizados, os sais de Al e Fe são ambientalmente indesejáveis pois os lodos produzidos podem disponibilizar íons solúveis.

A seguir na Tabela 2 são apresentados os principais os principais agentes coagulantes utilizados no tratamento CEPT:

**Tabela 2** - Principais coagulantes utilizados no CEPT e seu princípio

<b>Coagulantes</b>	<b>Princípio</b>
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> - Sulfato de Alumínio, PAC - Policloreto de Alumínio, FeCl <sub>3</sub> - Cloreto Férrico FeSO <sub>4</sub> - Sulfato Ferroso	Cátions polivalentes (Al <sup>3+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Fe <sup>2+</sup> ) neutralizam as cargas elétricas das partículas suspensas e os hidróxidos metálicos (Ex: Al <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> ), ao absorverem os particulados, geram uma floculação parcial.
Ca(OH) <sub>2</sub> - Hidróxido de Cálcio	Usualmente utilizado como agente controlador do pH. Porém, os íons cálcio atuam também como agentes de neutralização das cargas elétricas superficiais, funcionando como coagulante inorgânico.
Polímeros Aniônicos e não-iônicos	Geração de "pontes" entre as partículas já coaguladas e a cadeia do polímero, gerando flocos de maior diâmetro
Polímeros catiônicos	Neutralização das cargas elétricas superficiais que envolvem os sólidos suspensos e incremento do tamanho dos flocos formados (via formação de pontes). Usualmente utilizados no tratamento de lamas inorgânicas
Policátions	São polieletrônicos catiônicos de baixo peso molecular, os quais possuem como função principal a neutralização das cargas elétricas superficiais e aumento do tamanho dos flocos. Utilizados em substituição dos floculantes inorgânicos convencionais

**Fonte:** Kurita, (2010) – *Adaptado*.

De Feoa, De Gisia e Galassob (2008) avaliaram a eficiência do Sulfato de Alumínio, Policloreto de Alimínio (PAC) e Cloreto Férrico na estação de tratamento de esgotos sanitários com equivalente populacional de 200.000 habitantes na cidade de Avellino, no sudeste da Itália. Os coagulantes foram avaliados em doses de 10, 20, 30, 40 e 50 mg /L. Os autores avaliaram os parâmetros: variação do pH, sólidos sedimentáveis (S<sub>sed</sub>) e eficiência de remoção da DQO no tratamento. Os resultados são apresentados a seguir na Tabela 3:

**Tabela 3** - Testes utilizando Sulfato de Alumínio, PAC e Cloreto Férrico em tratamento CEPT na cidade de Avellino, Itália.

Coagulante	Dose (mg/L)	S <sub>sed</sub> (cm <sup>3</sup> /L)	DQO Removida (%)	Varição do pH (%)
Sulfato de Alumínio	10	10	9.3	5.06
	20	18	33.8	9.49
	30	28	35.8	12.03
	40	34	44.2	14.68
	50	43	49.9	16.58
PAC	10	30	45.5	9.32
	20	38	52.6	11.59
	30	52	47.8	14.86
	40	60	51.3	17.88
	50	80	63.9	21.03
Cloreto Férrico	10	26	35	3
	20	31	40	7.94
	30	47	51.8	13.62
	40	54	61.5	7.94
	50	56	85.4	13.62

Fonte: De Feoa, De Gisia e Galassob (2008) *Adaptado*.

De acordo com os resultados de DQO removida pode-se notar que as dosagens de Sulfato de alumínio promoveram menor diminuição da carga poluidora do efluente em relação ao PAC e o Cloreto Férrico. Tais resultados se confirmam na quantidade de lodo gerado com base nos valores de Sólidos Sedimentáveis (S<sub>sed</sub>) obtidos para o Sulfato de Alumínio, menor em relação ao PAC e o Cloreto Férrico. Dos coagulantes estudados, o Cloreto Férrico foi o que obteve melhor diminuição da DQO. Pode-se observar no estudo dos autores que o cloreto férrico promoveu menor variação do pH, o que segundo eles, demonstra uma vantagem em relação aos demais.

Segundo Di Bernardo (2009), para que o processo de coagulação/floculação seja eficiente, este deve ser realizado por meio de agitação intensa (mistura rápida) para que ocorram interações entre o coagulante e a água (efluente) e moderada para formação e agregação dos flocos.

De acordo com considerações para projeto do CEPT, a NBR 12.209 determina que:

- (a) A adição do coagulante deve ser realizada em ponto da estação que garanta de velocidade superior a 1000 s<sup>-1</sup>;

- (b) Quando for utilizado polímero, este também deve ser aplicado em local que permita sua adequada dispersão;
- (c) O emprego de ensaios de bancada para determinação das dosagens de produtos químicos a serem utilizadas na planta de tratamento;
- (d) Para a etapa de Floculação, deve-se ajustar o gradiente de velocidade para valores entre  $100 \text{ s}^{-1}$  e  $50 \text{ s}^{-1}$ . Esta condição de agitação deve ser mantida até a entrada do decantador, garantindo a qualidade dos flocos formados;
- (e) A remoção do lodo no decantador deve ser obrigatoriamente do tipo mecanizada.

De acordo com Figueiredo (2009) o gerenciamento e disposição do lodo gerado no CEPT são as maiores dificuldades deste tratamento. A produção de lodo no tratamento primário de forma geral depende de aspectos como: características do esgoto bruto; tempo de retenção deste lodo no interior do decantador (teor de sólidos), características dos sólidos sedimentados; tipo de remoção do lodo (manual ou mecanizada) e intervalo entre descargas de lodo (METCALF & EDDY, 2016). Em estudo desenvolvido por Cassini (2003), comparou-se os sistemas: DPC seguido por Lodos Ativados Convencional (LAC) e Decantadores Secundários (DC), e CEPT seguido por LAC e DS, ambos com equivalente populacional entre 65.000 e 75.000 habitantes. De acordo com o autor, no primeiro sistema (DPC+LAC+DC) a produção de lodo apresentou valores médios de Sólidos Totais (ST) da ordem de 50g/hab/dia e vazão diária de 0,20 L/dia. Já para o segundo sistema (CEPT+LAC+DPS) observou-se aumento significativo dos valores observados sendo 85 g/hab/dia para ST e 1,20 L/hab/dia para a vazão de lodo.

Considerando a biodegradabilidade do lodo gerado no CEPT, a Digestão Anaeróbia (DA) pode representar uma opção viável para sua destinação, tendo em vista a elevada recuperação de energia (JU *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2011). Além disso, a presença de íons metálicos derivados dos coagulantes utilizados, particularmente o íon férrico, mostrou melhorar o desempenho de reatores de DA (JU *et al.*, 2016). Hao *et al.* (2017) e Park e Novak (2013) relataram que tanto o aumento da remoção de Sólidos Voláteis, quanto o aumento da produção de metano poderiam ser alcançados pela adição de ferro durante a DA.

Ju *et al.* (2016) avaliaram a eficácia e as condições de tratamento de lodo esgoto sanitário coagulado com  $\text{FeCl}_3$  em tratamento (CEPT) utilizando a DA. Com base no resultado de 297 medições em diferentes condições operacionais demonstram um bom desempenho da DA do lodo do tratamento CEPT comparado ao lodo sem este tratamento, a

dosagem de  $\text{FeCl}_3$  somada aos aspectos operacionais tais como carga orgânica do lodo, temperatura e tempo de detenção hidráulica (TDH) afetaram significativamente o desempenho do DA, havendo melhora na produção específica de metano ( $\text{CH}_4$ ) em 38 a 54% e reduziu significativamente o teor de sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) no biogás (de 13.250 ppm para <200 ppm), contribuindo para recuperação de  $\text{CH}_4$  e viabilizando a limpeza simplificada de biogás para geração de energia.

### 3.4. Uso do $\text{FeCl}_3$ em tratamento CEPT

Em função da utilização dos coagulantes, o CEPT pode apresentar custo e dessa forma é necessário prever a elevação nos custos operacionais da ETE (METCALF & EDDY, 2016).

De acordo com Metcalf & Eddy (2016), a adequada escolha do coagulante a ser aplicado no tratamento dos efluentes deve estar atrelados a fatores importantes como: (a) concentrações afluentes de matéria orgânica, Sólidos, P e alcalinidade; (b) custo e garantia de fornecimento do produto químico; (c) segurança do operador durante o manuseio do produto; (d) gestão do lodo gerado; (e) compatibilidade com os processos de tratamento já implantados.

No âmbito deste trabalho, destaca-se o uso do  $\text{FeCl}_3$  como coagulante aplicado ao CEPT. A adição do íon férrico na água resulta em reações sequenciais de hidrólise produzindo hidróxido de ferro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), conforme Equação 1. Essa espécie promove a coagulação, seja por neutralização das cargas dos colóides, ou seja, por varredura (DI BERNARDO *et al.*, 2002).



Durante o processo de coagulação com  $\text{FeCl}_3$  observa-se acidificação do meio, condição que pode requerer o ajuste do pH ao final do processo de tratamento. Pode-se citar que o emprego do  $\text{FeCl}_3$  como coagulante tem como vantagem a boa qualidade dos seus flocos sob uma ampla faixa de pH, entre 5 e 11 (DI BERNARDO *et al.*, 2002).

Este coagulante possui como característica, a remoção de Fósforo. Neste processo, os íons ferrosos reagem com o Ortofosfato, produzindo o precipitado fosfato férrico ( $\text{FePO}_4$ ), de acordo com a Equação 2.



Observa-se a partir da Equação 2 que, para cada mol de Ferro adicionado à solução precipita-se 1 mol de Fosfato. No entanto, as reações ocorridas para remoção de fosfato são mais complexas, pois são concorrentes com outras reações, tais como: formação de uma cadeia de espécies hidrolisadas, incluindo algumas espécies poliméricas e hidróxidos metálicos; formação de espécies de coagulantes capazes de desestabilizar outros constituintes presentes nos esgotos (DI BERNARDO *et al.*, 2002; METCALF & EDDY, 2016). Sendo assim, no caso de esgotos sanitários, não é possível estimar diretamente a dosagem de sais metálicos a ser utilizada para efetiva remoção de fósforo.

Na Tabela 4 encontram-se valores típicos para as razões molares entre ferro e fósforo (Fe:P), considerando eficiências de remoção de P de 75%, 85% e 95%. (YOSHIDA, 2005):

**Tabela 4** - Relação Molar entre Fe e P em função da taxa de remoção de Fósforo

Remoção de P <sub>(Total)</sub> (%)	Cloreto Férrico (FeCl <sub>3</sub> ) Fe:P
75	1,1:1 a 1,7:1
85	1,5:1 a 2,1:1
95	2,3:1 a 2,8:1

Fonte: Adaptado de Yoshida (2005).

A NBR 12.209/1992 expõe relações molares para a remoção de P a serem utilizadas. Ao ser adicionado ao esgoto bruto esta norma recomenda uma relação F e:P mínima de 2,5 e no caso de se proceder a coagulação em efluentes de tratamento biológico, deve-se adotar a relação mínima de 1,5:5. Contudo, a norma recomenda a realização de testes para a adequada determinação das dosagens a serem aplicadas no tratamento como, por exemplo, a aplicação de ensaios *Jar Test*.

De acordo com Margutti, Filho e Pivelli (2008), de um modo geral, a vantagem da adoção de processos físico-químicos de remoção de fósforo em ETEs em relação aos processos biológicos é a sua flexibilidade, podendo ser facilmente adaptados em unidades já dimensionadas ou quando há a necessidade de expansão de sistemas já existentes. Os processos biológicos por sua vez apresentam uma maior complexidade operacional por serem altamente dependentes do comportamento da biomassa ativa, das condições ambientais e das características do substrato afluente (METCALF E EDDY, 2016). Portanto, a utilização de

processos físico-químicos de remoção de fósforo tem sido vista como alternativa tecnológica bastante promissora, podendo este ser empregado de forma isolada ou conjuntamente com os processos biológicos (MARGUTTI, FILHO e PIVELLI, 2008).

Na Tabela 5 a seguir, é apresentado um compilado das vantagens e desvantagens do CEPT e outras tecnologias de remoção de P em esgotos sanitários, bem como sua faixa de aplicação (mgP/L) e eficiência de remoção deste composto.

**Tabela 5** - Principais tecnologias de remoção de P

<b>Tratamento</b>	<b>Faixas de aplicação (mgP/L)</b>	<b>Eficiências de remoção (%)</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
CEPT	>50	60-65	Facilidade de operação/Robustez	Elevado custo operacional dos coagulantes. Produção de lodo químico que necessita de gerenciamento
Adsorção	0,5-50	75-90	Facilidade de operação, Eficiência de remoção independente da concentração de fósforo no efluente	Elevado custo operacional dos adsorventes
Remoção biológica aprimorada	10-125	75-98	Ausência de produtos químicos e remoção paralela de nitrogênio	Complexidade operacional, produção elevada de lodo biológico e difícil recuperação de fósforo do lodo
Wetlands	>0.3	65-99	Elevada eficiência de remoção, reúso da biomassa como fonte de proteína e carboidratos.	Complexidade operacional, baixa tolerância a elevadas cargas orgânicas e sensibilidade a temperaturas baixas.
Biorreatores de microalgas	>0.1	85-100	Elevada eficiência de remoção, Remoção paralela de matéria orgânica e nitrogênio. Reúso de biomassa como fonte de proteína, gordura e pigmentos naturais.	Dificuldade de escalonamento. Instabilidade operacional (aspectos biológicos e físicos)

Fonte: Manzoni *et al.*, (2014).

Estudos realizados por Wang *et al.*. (2009) indicaram a remoção de 60% de Sólidos Suspensos Totais (SST) para a dosagem de 30 mg/L de FeCl<sub>3</sub> e 0,5 mg/L de polímero

aniônico. Em testes em maior escala, mantendo-se as mesmas dosagens e a condição de batelada, os percentuais de remoção de SST, nitrogênio e fósforo foram, respectivamente, superiores a 80%, 70% e 40%.

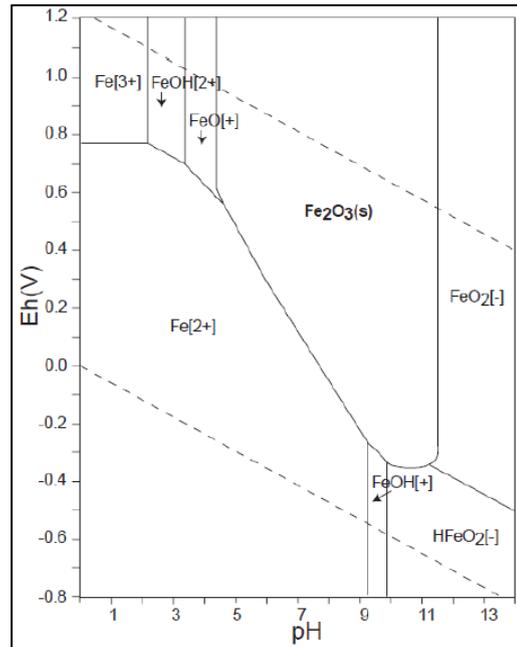
A ampla faixa de pH ideal para a coagulação representa uma vantagem do uso do  $\text{FeCl}_3$  em relação aos demais. Em estudos realizados por Haydar e Azyz (2009) indicaram que a faixa de pH de 7,55 à 9,51 em águas residuárias de indústria de curtume não tiveram efeito significativo na eficiência da coagulação e floculação no tratamento CEPT.

Em testes desenvolvidos por Gong *et al.* (2017) com efluentes de bovinocultura, o tratamento CEPT permaneceu estável em sua operação em um pH na faixa de 6 a 9, e a melhor eficiência de remoção de DQO foi alcançada em pH 7,0. Enquanto isso, a melhor eficiência de remoção de  $\text{P}_{\text{total}}$  (mg/L) foi alcançada em pH 8,0. Ainda segundo os autores, não houve necessidade de ajustar o pH para otimizar o CEPT.

### **3.5. Obtenção do $\text{FeCl}_3$ por meio dos óxidos de ferro**

Como exposto anteriormente, o  $\text{FeCl}_3$  é comumente utilizado como coagulante no tratamento CEPT. Porém, é notório que o uso de produtos químicos podem se tornar insustentáveis para operação nas ETEs pois, representam altos custos. Dessa forma, o desenvolvimento de novos produtos químicos ou formas alternativas de obtenção dos coagulantes já consolidados no CEPT deve ser considerado. Dentro dessa problemática, é importante considerar formas de se obter coagulantes a partir de resíduos de processos produtivos que possuam elementos considerados matéria prima para sua produção. De acordo com Menezes (2009), Niu *et al.* (2011) e Silva (2014), a solubilização de óxidos de ferro presentes em alguns resíduos de processos produtivos podem representar uma boa opção para tal.

De acordo com Dias *et al.* (2016), a solubilização do Ferro esta diretamente ligada ao pH da mesma. Em condição de equilíbrio químico, o grau de dissociação dos hidróxidos na forma Férrica e Ferrosa são em função da concentração do íon hidrogênio ou pH da solução. Portanto, é possível através de um diagrama pH e potencial redox (Eh), verificar a forma predominante que o ferro se encontra em uma dada condição do meio aquoso como exposto na Figura 2 a seguir:

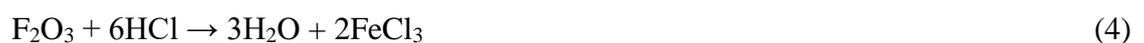


**Figura 2** - Diagrama de estabilidade de Ferro em meio aquoso.

**Fonte:** Dias *et al.* (2016).

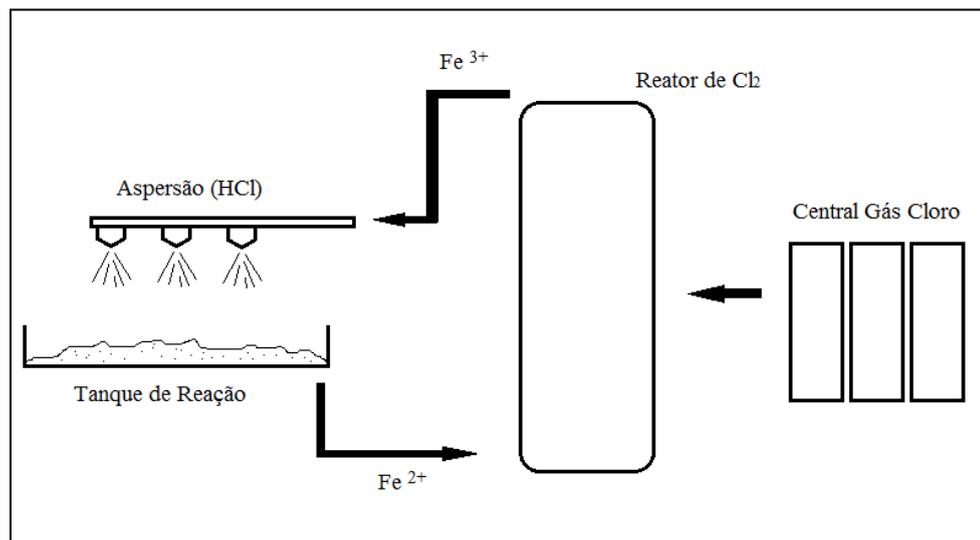
Por meio do diagrama acima, é possível observar que o ferro encontra-se na forma de íon férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) em valores baixos de pH. Com o aumento do pH ocorre a formação de hidróxidos de ferro e uma diminuição da solubilidade. O aumento positivo dos valores do potencial redox (Eh) representa aumento na intensidade da oxidação. Como regra geral, as reações de oxidação do ferro são rápidas para alcançar o equilíbrio com o pH próximo da neutralidade. As taxas de oxidação do ferro em meio aquoso ácido ocorrem muito lentamente, ao menos que seja introduzido um agente catalisador na solução (DIAS *et al.*, 2016).

De acordo com Silva (2014) tendo em vista o diagrama descrito, a dissolução dos óxidos de ferro como por exemplo, a Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e a Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) pode ocorrer em meio ácido, e utilizando solução de Ácido Clorídrico (HCl) e gerar o  $\text{FeCl}_3$  como exposto nas equações 3 e 4 a seguir:



De acordo com Silva (2014), na indústria o  $\text{FeCl}_3$  é produzido a partir de barras, chapas e perfis de aço. O processo é realizado em reator de oxidação, onde são colocadas as chapas, barras e os perfis de aço. Em um tanque de água é injetado gás cloro, tornado-a ácida (HCl). A água é conduzida por uma tubulação e é aspergida sobre a fase metálica. Quando a

água entra em contato com as chapas de aço, se inicia o processo de solubilização do ferro, inicialmente produz-se a forma ferrosa ( $\text{Fe}^{2+}$ ). A água é recolhida e retorna de forma cíclica para o reator de adição de gás cloro, convertendo o  $\text{Fe}^{2+}$  para  $\text{Fe}^{3+}$  (Forma férrica). Este processo se dá na forma contínua e segue até que sejam atingidas as condições ideais do coagulante, principalmente em relação a concentração de  $\text{Fe}_{\text{total}}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  na forma férrica e cada batelada de produção pode durar cerca de 3 dias (SILVA, 2014). A figura 3 ilustra o processo de produção do  $\text{FeCl}_3$ :



**Figura 3** - Esquema de produção de  $\text{FeCl}_3$  em escala industrial

**Fonte:** Silva (2014), Adaptado.

### 3.6. Uso de RMFs como insumo para produção de $\text{FeCl}_3$

A exploração mineral desempenha papel importante no crescimento do Produto Interno Bruto – PIB do Brasil. Neste contexto, o Estado de Minas Gerais, destaca-se no setor da mineração brasileira, possuindo uma produção de cerca de 53% de minerais metálicos e 29% de outros minérios (IBRAM, 2016). Entretanto, ainda que a mineração seja importante para a economia do país, destaca-se que essa atividade impacta significativamente o meio ambiente.

Os minerais são encontrados puros na natureza, necessitando, portanto, de processos de beneficiamento que viabilizem a máxima concentração econômica do minério ou a

obtenção de determinada granulometria (GOMES *et al.*, 2019). No entanto, os processos de beneficiamento não conseguem aproveitar todo o minério lavrado, gerando, além do concentrado, o rejeito, que é um material de pouco valor econômico, comumente lançado em barragens de contenção (GOMES *et al.*, 2019).

De acordo com Ferrante (2014), o processo de beneficiamento de minérios de Ferro prepara granulometricamente, purifica ou enriquece minérios por métodos físicos ou químicos, sem alteração da constituição química dos minerais. Ainda segundo a autora, o beneficiamento divide o mineral bruto em concentrado e rejeito. Os minerais que são descartados do processo de beneficiamento, por não possuírem teor ou granulometria adequados, são caracterizados como rejeitos.

Portes (2013) descreve o rejeito de mineração como todo o material resultante de processos químicos e físicos envolvidos na extração dos metais, e ressalta ainda que consequências inevitáveis dos processos de tratamento a que são submetidos os minérios, sendo gerados, paralelamente, ao material de interesse. Em função da exaustão de minério de alto teor e da crescente lavra de minérios cada vez mais pobres, a geração de rejeitos é cada vez maior. Os rejeitos da mineração estão associados ainda à seu alto impacto no meio ambiente, por ocuparem grandes áreas para sua disposição em barragens, supressão da vegetação e afetarem a qualidade física e química de águas superficiais e subterrâneas.

É importante ainda, associar a geração de rejeitos da mineração ao eminente risco de rompimento das barragens de contenção como os casos ocorridos nos municípios de Mariana em Novembro de 2015, e Brumadinho em Janeiro de 2019, ambos no Estado de Minas Gerais. O primeiro caso considerado o desastre ambiental ocorrido no Brasil e o segundo, considerado o maior acidente de trabalho em número de óbitos. Por este motivo, a disposição de rejeitos em barragens de contenção possivelmente tem se tornado motivo de preocupação cada vez maior nas empresas, que buscam minimizar os impactos ambientais e os custos associados aos processos de disposição, contenção e fechamento de barragens de rejeito.

Tendo em vista o risco eminente a Agência Nacional de Mineração (ANM), definiu uma série de medidas de precaução de acidentes nas cerca de mil barragens existentes no país, começando neste ano e prosseguindo até 2021 por meio da resolução nº 6/2019. A medida inclui a extinção ou descaracterização das barragens chamadas “a montante” até 15 de agosto de 2021 (BRASIL, 2019). Segundo o documento, há 84 barragens no modelo denominado a montante em funcionamento no país, das quais 43 são classificadas de alto dano potencial: quando há risco de rompimento com ameaça a vidas e prejuízos econômicos e ambientais.

Os rejeitos podem ser descartados sob a forma sólida (pasta ou granel), ou líquida

(polpa de água com sólidos ou lama), podendo sua disposição ser feita em superfície, em cavidades subterrâneas ou em ambientes sub-aquáticos, esta última com algumas restrições do ponto de vista ambiental (FERRANTE, 2014). A forma de disposição dos rejeitos está relacionada diretamente ao tipo de minério e de processo empregado para o seu beneficiamento.

Visando minimizar os altos impactos gerados pela disposição de rejeitos em barragens de contenção, se faz importante buscar alternativas para reaproveitar esse material de maneira econômica e sustentável e um passo importante para isso é entender a concentração de minerais ainda presentes nesses resíduos.

Em testes realizados em escala de bancada com amostras de RMF realizados Rocha e Peres (2009) utilizando o processo de flotação catiônica reversa foi possível obter entre 60% e 80% de recuperação metálica, teores de 9 a 12% de  $\text{Fe}^{3+}$  no rejeito e de 0,55% a 0,90% de Sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Ajaka (2009) realizou testes de recuperação de minerais de rejeitos da mina de minério de ferro de Itakpe, na Nigéria, e utilizando processos de sedimentação e processo de flotação os resultados obtidos mostraram que os teores dos concentrados alcançaram valores entre 41 e 62% de  $\text{Fe}_{\text{total}}$  via sedimentação e flotação. Análises químicas de amostras de rejeitos da mina de Barsua, Índia, indicaram a presença de 48,30% de Fe, 10,88% de  $\text{SiO}_2$  e 12,62 % de alumina.

(GHOSE e SEN, 1999).

Martini *et al.* (2016) realizou testes com a aplicação de técnica geofísica, conhecida como Radar de penetração (GPR), para definir a existência de padrões de sedimentos de RMF na subsuperfície do reservatório da barragem de rejeito do Diogo, em Rio Piracicaba, no estado de Minas Gerais, Brasil. Os resultados indicaram a presença de rejeitos com alta concentração de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  (em torno de 60% e 37% na análise mineralógica respectivamente). Estudo realizado por Gomes, Pereira e Peres (2011) avaliou 17 pontos de amostragem em barragem de RMF e encontraram concentrações médias de 67,54% de Fe, 1,50% de  $\text{SiO}_2$  e 0,49% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , valores considerados próximos do produto comercializado pela empresa.

Os resultados obtidos a partir dos testes de realizados pelos autores mostram que por meio de uma concepção cuidadosa, é possível utilizar os minerais presentes de forma significativa no RMF perdido como resíduo na rota de processo da planta de beneficiamento das minas. É notória a quantidade considerável de Fe presente nas amostras analisadas (sob a forma de  $\text{Fe}_{\text{total}}$  e/ou  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Diante disto, é fácil concluir que há grande potencial para o desenvolvimento de técnicas que visem a obtenção de  $\text{FeCl}_3$  a partir destes resíduos uma vez

que estes se constituem em grandes ativos econômicos imobilizados, ante a inexistência tecnológica atual de técnicas que permitam o seu uso e se convertem em grandes passivos ambientais.

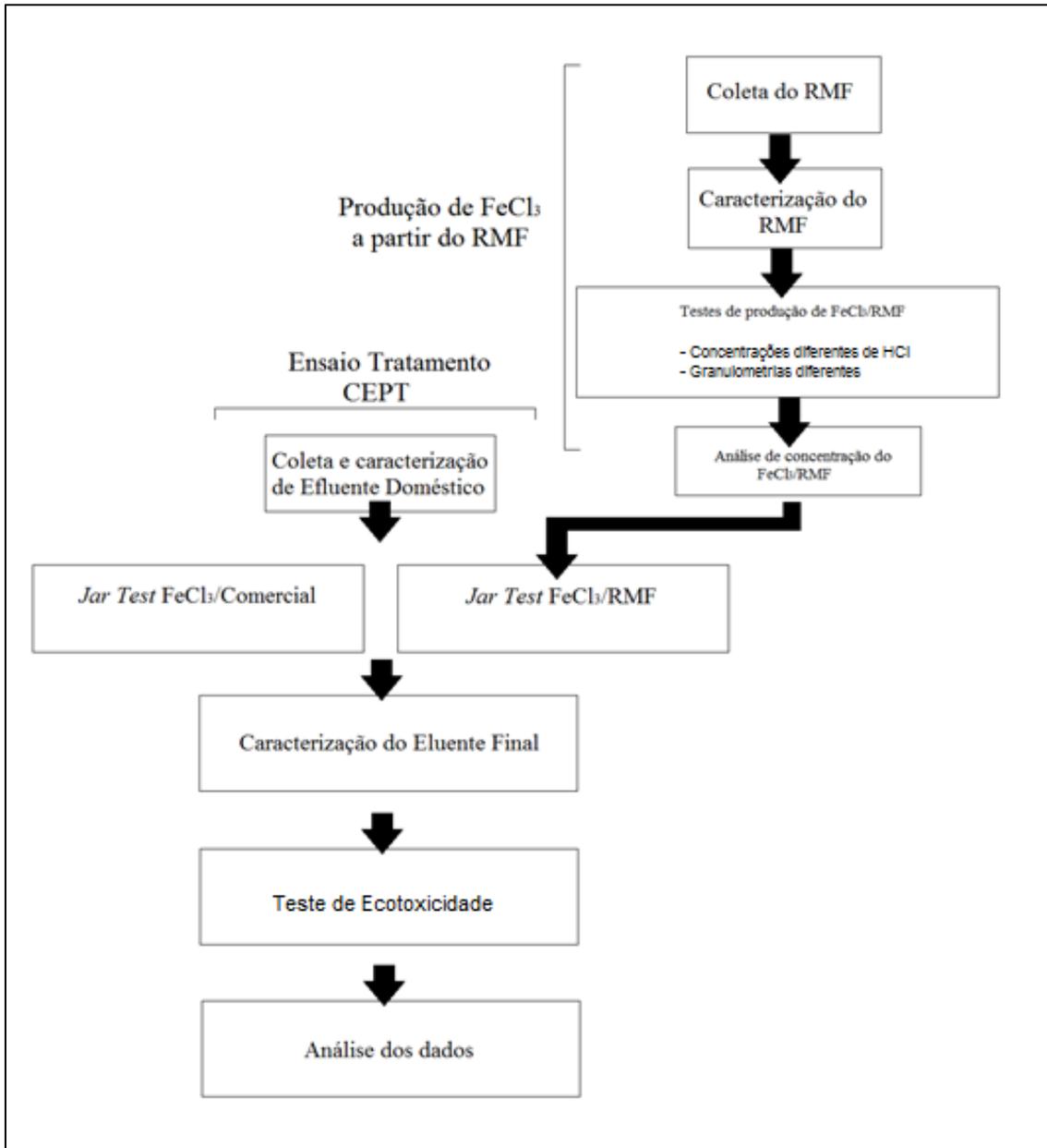
#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

##### 4.1. Método da pesquisa

Este trabalho busca uma abordagem quantitativa e de natureza experimental podendo ser dividida nas seguintes etapas:

- (a) Coleta e caracterização do rejeito da mineração utilizado como matéria prima para produção do  $\text{FeCl}_3$ , determinando seus atributos físicos e químicos;
- (b) analisar a produção de  $\text{FeCl}_3$  a partir do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  presente nas amostras do rejeito;
- (c) simular CEPT de bancada tratando esgoto sanitário utilizando o  $\text{FeCl}_3$  gerado a partir do RMF;
- (d) analisar a ecotoxicidade do efluente (esgoto sanitário) após a aplicação do coagulante utilizando micro crustáceos *Daphinea magna*.

A metodologia utilizada pode ser resumida por meio do fluxograma apresentado na Figura 4.



**Figura 4** - Esquema da metodologia empregada no trabalho

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

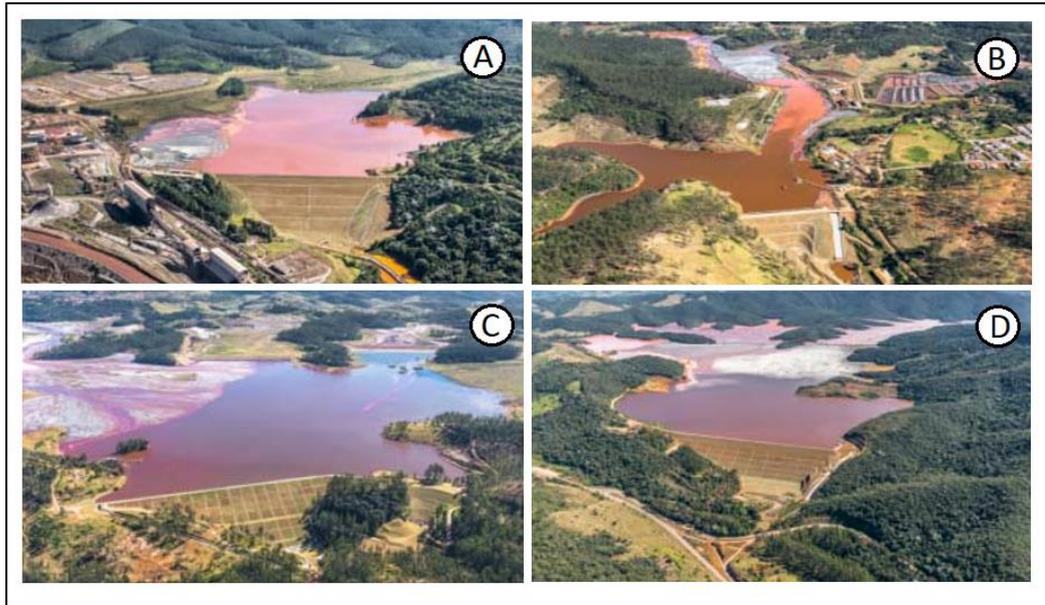
Inicialmente foi coletado o RMF e posteriormente, realizou-se sua caracterização física e química. O seguinte passo consistiu na produção de  $\text{FeCl}_3$  a partir do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  presente no RMF e bem como a análise da concentração obtida. Após a obtenção do  $\text{FeCl}_3/\text{RMF}$  a próxima etapa consistiu em sua aplicação em ensaios de Tratamento CEPT de Esgotos Sanitários e também uma comparação utilizando o  $\text{FeCl}_3$  comercial. Os passos finais consistiram na caracterização do efluente final, analisando parâmetros físicos e químicos importantes e, bem como, a ecotoxicidade e análise dos dados gerados.

## 4.2. Amostragem e caracterização do rejeito da Mineração de Ferro

As amostras de rejeito utilizadas na pesquisa foram coletadas em uma barragem de contenção de uma mineradora localizada no município de Itabira, Minas Gerais. O município de localiza-se a aproximadamente 100 km da capital do Estado de Minas Gerais. Encontra-se inserido na extremidade nordeste da unidade geológica denominada Quadrilátero Ferrífero cujas reservas medidas de minério de ferro atingem a marca de 10 bilhões de toneladas (LAMBERTINI e OBERDIECK, 2015). Limítrofe à malha urbana do município, encontra-se o Complexo minerário Itabira, responsável pela produção anual de 50 milhões de toneladas de minério de ferro (LAMBERTINI e OBERDIECK, 2015).

A mineradora mantém no município quatro sistemas de deposição de rejeito em barragens conforme critérios estabelecidos pela Lei 12.334/2010 e pela Portaria DNPM N° 70.389/2017 sendo eles (Figura 05):

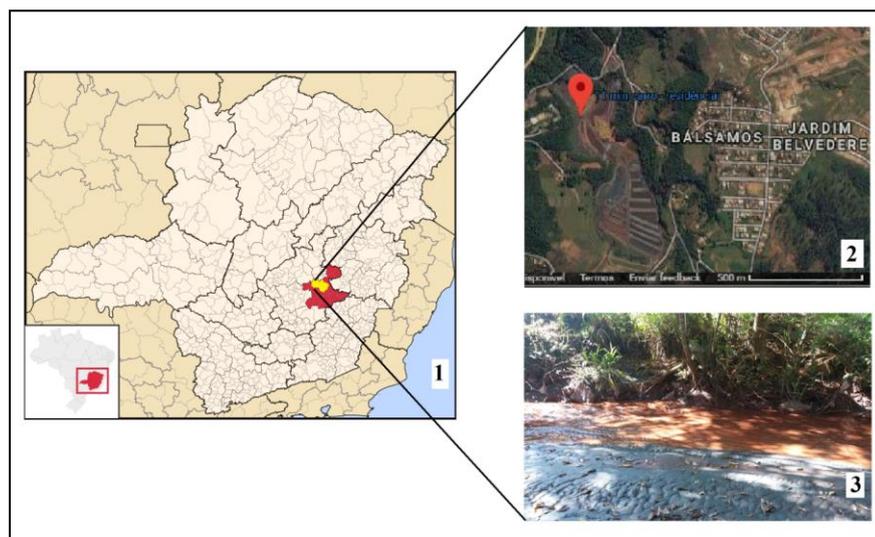
- (a) Sistema Conceição: localizada na Mina Conceição, com 41 anos, com capacidade para 43,5 milhões de metros cúbicos e que atualmente tem 35,9 milhões de metros cúbicos de rejeito dispostos;
- (b) Sistema Conceição II: localizada na Mina Conceição, com 41 anos, capacidade para 14,7 milhões de metros cúbicos, e atualmente com 13,8 milhões de metros cúbicos de rejeito dispostos.
- (c) Sistema Pontal: localizado na Mina do Cauê, com 46 anos, capacidade de 234,7 milhões de metros cúbicos. Atualmente com 220,4 metros cúbicos;
- (d) Sistema Itabiruçu: localizada na Mina Conceição, com 37 anos, capacidade de 220,8 milhões de metros cúbicos. Atualmente com 130,9 milhões de metros cúbicos.



**Figura 5** - Sistemas de barragens localizados no município de Itabira: (A) Sistema Conceição, (B) Sistema Conceição II, (C) Sistema Pontal e (D) Sistema Pontal.

**Fonte:** Página web Mineradora Vale - *Adaptado*

Para a realização do experimento optou-se por coletar amostras de rejeito dispostas em ponto a jusante do sistema de contenção da Conceição II, localizado nas coordenadas geográficas  $19^{\circ}39'55.9''\text{S}$   $43^{\circ}14'40.6''\text{W}$  (GPS Garmin, modelo 60Cx) (FIGURA 6).



**Figura 6** - (1) Localização do município de Itabira no Estado de Minas Gerais (Wikipédia, 2018), (2) – Imagem de satélite do ponto de coleta (Google, 2018), (3) – Ponto de Coleta à jusante da Barragem da Conceição

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2018).

Após a coleta, foi realizado a sua caracterização física do RMF quanto ao pH, Porosidade, Teor de umidade, granulometria (tamanho das partículas), Massa específica aparente e Massa específica do meio. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Solos da UNIFEI, *campus* Itajubá e as metodologias descritas na Tabela 6.

**Tabela 6** - Análises de caracterização das amostras de Rejeito da Mineração de Ferro

<b>Análise</b>	<b>Método</b>	<b>Equipamentos</b>	<b>Referências</b>
pH	Potenciométrico	pH-metro – Digimed DM-20	ASTM D4-972 (1999)
Porosidade	Volumétrico	Balança analítica <i>Shimadzu</i> modelo IUY220	ABNT NBR6457 (2016)
Teor de umidade	Volumétrico	Estufa Biopar modelo 51505	ABNT NBR6457 (2016)
Granulometria	Peneiramento	Agitador eletromagnético peneiras marca Lab1000 – modelo 04147	ABNT NBR 7180 (1984)
Massa específica Aparente	Volumétrico	Balança analítica <i>Shimadzu</i> modelo IUY220 e provetas graduadas	ABNT NBR6457 (2016)
Massa específica do meio	Volumétrico	Balança analítica <i>Shimadzu</i> modelo IUY220 e provetas graduadas	ABNT NBR6457 (2016)

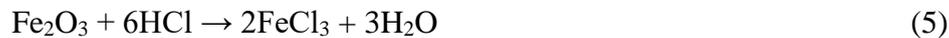
**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

Foram realizadas ainda análises em quadruplicata dos componentes químicos do RMF por meio de Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV-EDS) (Marca Zeiss, modelo EVO 10) no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da UNIFEI 4 análises da composição do RMF em relação a elementos químicos predominantes tais como: Fe (Ferro), O

(Oxigênio), C (Carbono), Si (Silício), Al (Alumínio), Na (Sódio) e Ca (Cálcio), dentre outros.

### 4.3. Produção de Cloreto Férrico a partir do rejeito

A obtenção de  $\text{FeCl}_3$  se deu por via ácida. O RMF foi previamente seco em estufa a  $105\text{ }^\circ\text{C}$  por 24 horas e posteriormente combinado com solução de ácido clorídrico analítico (HCl-PA) sob agitação à 70% e aquecimento à  $80\text{ }^\circ\text{C}$ . A reação se deu por meio da equação 5 a seguir:



Neste trabalho foi testado a produção de quatro soluções  $\text{FeCl}_3$  a partir do RMF por meio de diferentes soluções/concentrações de HCl baseando-se no estudo de Silva (2014) como exposto na Tabela 7:

**Tabela 7** - Soluções de ácidas de HCl utilizadas na produção de  $\text{FeCl}_3$

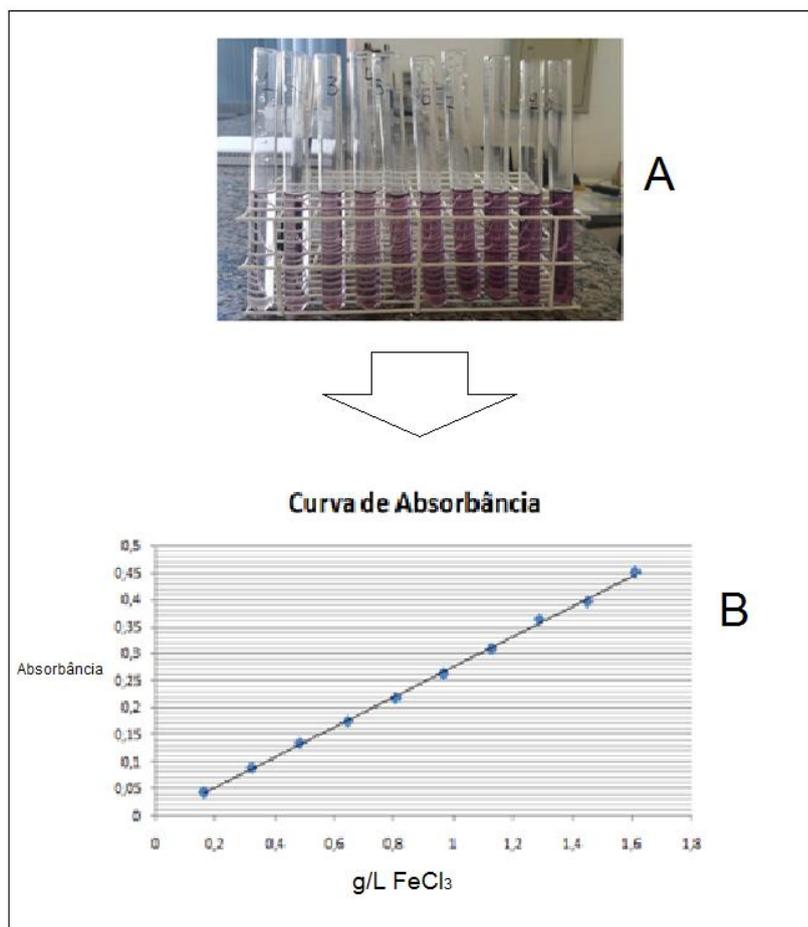
Solução de HCl	% de HCl	HCl em mol/L
1	20	2,44
2	60	7,31
3	80	9,74
4	100	12,18

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

O tempo de reação foi determinado como 1 hora. A massa do RMF como 5g para cada extração (SILVA, 2014). A solução ácida juntamente com o RMF foi mantida em agitador magnético por 1 hora. Após a acidificação, realizou-se a separação do sedimento e o líquido sobrenadante em centrífuga por 15 minutos à 3000 RPM de modo a garantir que não haja sólidos presente na solução. Os sólidos sedimentados centrifugados foram secos em estufa a  $105\text{ }^\circ\text{C}$  e pesados para que ao final fosse possível comparar a extração do rejeito com o peso final da amostra a fim de se quantificar a fração dissolvida nas soluções de HCl.

#### 4.4. Análise da concentração do coagulante

Para a determinação da concentração de  $\text{FeCl}_3$  nas soluções obtidas, tomou-se como base a metodologia proposta por Sena *et al.* (2015) para análise qualitativa e quantitativa de íons  $\text{Fe}^{3+}$ . O método consistiu na reação do  $\text{Fe}^{3+}$  presente nas amostras de  $\text{FeCl}_3$  produzidos a partir do RMF com uma solução de ácido salicílico (0,02 mol/L), formando uma nova solução de cor violeta (devido a presença do complexo formado entre o salicilato e o íon ferro III), que indica a presença da espécie. Para tal feito, obteve-se uma curva de calibração a partir de uma solução de  $\text{FeCl}_3$  padrão de 0,1 mol/L (16,1 g/L), diluída em concentrações de 1,61 g/L até 0,161 g/L, que foram analisadas em um espectrofotômetro em um comprimento de onda de 465 nm. Na Figura 7, é apresentada as diluições de  $\text{FeCl}_3$  e ácido salicílico utilizadas na curva de calibração.



**Figura 7** - (A) Concentrações de  $\text{FeCl}_3$  analítico padrão em ácido salicílico e (B) curva de calibração gerada em espectrofotômetro.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

Com os valores obtidos na análise e os respectivos cálculos, obteve-se a equação 6 a seguir, que relaciona absorvância e a concentração. A partir desta, pôde-se obter a concentração de  $\text{FeCl}_3$  nas amostras de coagulante produzidas ( $\text{FeCl}_3/\text{RMF}$ ):

$$C \text{ (g/L)} = \frac{A-0,003}{0,278} \quad (6)$$

Onde:

C: Concentração de  $\text{FeCl}_3$  (g/L)

A: Absorvância obtida em comprimento de onda de 465 nm (adimensional)

#### 4.5. Simulações de tratamento CEPT em escala de bancada

Neste trabalho realizou-se ensaios de bancada de coagulação, floculação e sedimentação de esgotos sanitários por meio da aplicação do  $\text{FeCl}_3/\text{RMF}$  em solução á 10 g/L. Para isso utilizou-se um aparelho *Jar Test* marca Nova Ético (modelo 218 – 3LBD) (Figura 8) constituído de seis jarros de 2 litros de capacidade. Este equipamento permite determinar as condições de coagulação, floculação e sedimentação do efluente em escala laboratorial. Para isso, foram adotados valores de parâmetros operacionais simulados nos ensaios *Jar Test* obtidos por Santos Neto (2004) utilizando efluentes sanitários, apresentados na tabela 8.



**Figura 8** - *Jar Test* utilizado no experimento

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2018).

**Tabela 8** - Parâmetros operacionais aplicados ao *Jar Test*

Etapa CEPT	Parâmetro	Valores	Tempo (segundos)
Coagulação	Gradiente de Mistura rápida (GM)	1000 s <sup>-1</sup>	Mistura rápida (TM): 60
			Mistura Lenta (TL): 600
Floculação	Gradiente de Floculação (GF)	85 s <sup>-1</sup>	Sedimentação (Ts): 1800
Sedimentação	Velocidade de Sedimentação (VS)	0,011 cm/s	

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

Além dos ensaios *Jar Test* com o FeCl<sub>3</sub> /RMF, foi realizado ensaios com solução de FeCl<sub>3</sub>/Comercial à 10,0 g/L para comparação com o produto produzido a partir do RMF. Em cada um dos 6 jarros foi utilizado 1,5 L da amostra do efluente.

Nos ensaios *Jar Test* foram utilizadas concentrações diferentes do FeCl<sub>3</sub>/Comercial e do FeCl<sub>3</sub> /RMF. Estas concentrações foram aplicadas de acordo com valores sugeridos por Silva (2009) para FeCl<sub>3</sub> tratando esgotos sanitários e descritos na Tabela 9.

**Tabela 9** - Ensaio de coagulação e floculação utilizando FeCl<sub>3</sub>/Comercial

Jarro	Concentração FeCl <sub>3</sub> (mg/L)	Parâmetros fixos
1	50	
2	75	
3	100	G <sub>M</sub> , G <sub>F</sub> , V <sub>S</sub> , T <sub>M</sub> , T <sub>L</sub> , T <sub>S</sub>
4	125	
5	150	

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

Foram realizados 20 ensaios *Jar Test*, sendo 10 utilizando o FeCl<sub>3</sub>/comercial e 10 o FeCl<sub>3</sub> /RMF. Estes ensaios foram realizados, entre os meses de Julho de Outubro de 2018, com frequência de duas vezes por semana.

Para a realização dos ensaios foram utilizadas amostras de esgoto sanitário bruto coletado na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) de Itajubá (MG), administrada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). As amostras foram coletadas em um ponto na entrada da estação denominada Caixa Divisora de Vazão 1 (CDV1) (Imagem 9), após as unidades de tratamento Gradeamento e medidor *Parshall*.

**Figura 9** - Ponto de coleta de efluente - CDV1 – ETE Itajubá – MG

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2018).

Antes e depois do tratamento CEPT em escala de bancada, foram analisados os seguintes os seguintes parâmetros de qualidade (Tabela 10) de acordo com metodologias expostas em *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2005):

**Tabela 10** - Parâmetros físico químicos a serem analisados

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade de medida</b>	<b>Método</b>	<b>Referência</b>
pH	-	Potenciométrico *	
Fósforo Total (P <sub>Total</sub> )*	mg/L	Espectrofotométrico	4500 P*
Alcalinidade*	mgCaCO <sub>3</sub> /L	Titulação	2320*
Turbidez	UNT (unidades de Turbidez)	Nefelométrico***	
DQO total*	mg/L	Espectrofotométrico	5220*
Sólidos Sedimentáveis*	mL/L	Físico	2540*

\* *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2005)

\*\* Potenciômetro de bancada – Modelo Digimed – DM 20

\*\*\* Turbidímetro de bancada – Modelo Policontrol – AP2000 IR

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

#### 4.6. Análise da ecotoxicidade

Tendo em vista a possibilidade da aplicação do CEPT como pré tratamento biológico de esgotos domésticos e disposição final do efluente no meio aquático como cursos d'água e mananciais de abastecimento, foram realizado análises de ecotoxicidade das amostras após o ensaio utilizando o efluente após o tratamento CEPT. Este teste se faz importante também para analisar a possível formação de subprodutos tóxicos a partir da reação outros elementos presentes no rejeito com o HCl.

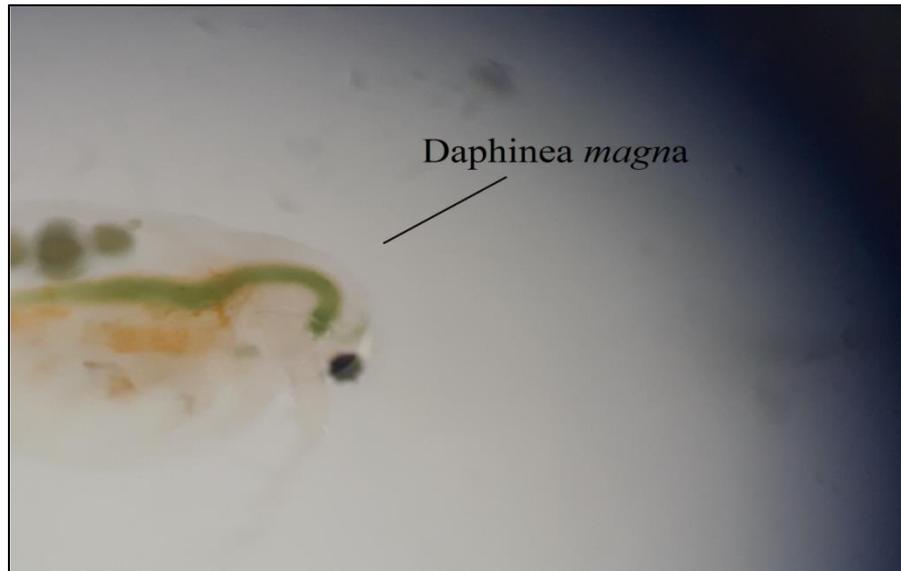
Para a realização dos testes, coletou-se amostras do efluente da concentração tomada como ótima do FeCl<sub>3</sub>/RMF considerando critérios como melhor eficiência de remoção da Turbidez, DQO e P<sub>total</sub> e, maior produção de Sólidos Sedimentáveis. A título de comparação, foi aplicado também testes utilizando o efluente da concentração tomada como ótima do

FeCl<sub>3</sub>/Comercial considerando os mesmos critérios.

Os testes de ecotoxicidade foram aplicados utilizando microcrustáceos da espécie *Daphnia magna* (imagem 10) segundo a norma ISO 6341 e executados no Laboratório de Limnologia da Unifei – Campus Itajubá. Através deste ensaio é possível avaliar os efeitos tóxicos de determinada amostra em relação a uma população de um organismo observando variáveis biológicas como: letalidade, imobilidade, alteração no desenvolvimento, crescimento, reprodução, metabolismo, fisiologia e comportamento (ARAGÃO; ARAUJO, 2008).

Para a realização dos ensaios neste trabalho avaliou-se a letalidade da *Daphnia magna* após a exposição do efluente tratado em CEPT por FeCl<sub>3</sub>/RMF e FeCl<sub>3</sub>/Comercial em 4 concentrações distintas após 24 horas a fim de se calcular a Concentração Efetiva de efeito agudo de letalidade a 50% dos organismos (CE50). Utilizou-se neste trabalho, 10 organismos em triplicata para cada concentração analisada (30 organismos, divididos em 3 béqueres). Para a realização dos testes foram utilizados béqueres contendo de 50 mL das amostras do efluente tratado em concentrações diferentes: sem diluição (100%), e diluídas à 75%, 50% e 25%. Foi utilizado também apenas água de cultivo como controle do processo. Para cada diluição foram adicionados 10 organismos-teste com auxílio de uma pipeta. O esquema do teste se encontra no Apêndice 3.

Os recipientes de ficaram protegidos e em local escuro, por isso foram cobertos com uma manta escura e mantidos em incubadora para controle de temperatura (22°C). Para cada concentração foi observada a imobilidade e/ou a mortalidade dos indivíduos após o período de exposição de 24 e 48 horas, encerrando o teste após 48 horas. A partir dos dados de imobilidade e/ou mortalidade do organismo-teste, calculou-se a CE50 utilizando o método de Spermán-Karber “*Trimmed Spermán-Karber method for estimating medial lethal concentration in toxicity bioassays*” para a avaliação da toxicidade aguda através do *software* “*JSPear test*” (Apêndice 4).



**Figura 10** - Microcústáceo *Daphinea magna* – imagem de em lupa analítica.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

#### **4.7. Tratamento dos dados**

Para tratamento dos dados obtidos nos ensaios CEPT, foi realizado análise descritiva abrangendo valor máximo, mínimo, mediana, média e desvio padrão dos parâmetros analisados. O tratamento dos dados foi realizado por meio do programa *Bio Static 5.0*. Os valores obtidos foram apresentados em forma de gráficos e tabelas a fim de auxiliar a interpretação dos resultados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foram conduzidos ensaios de caracterização do RMF e produção do  $\text{FeCl}_3$  a partir deste resíduo. A seguir são apresentados os ensaios de caracterização física e química das amostras de RMF e posteriormente, testes de produção do  $\text{FeCl}_3/\text{RMF}$ .

### 5.1. Caracterização Física do RMF

A seguir na Tabela 11, são apresentados os resultados do pH, Porosidade (%), Teor de umidade (%), massa específica aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) e massa específica do meio ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), das amostras de RMF. Os testes foram realizados em triplicata (Testes 1, 2 e 3) e as médias, calculadas:

**Tabela 11** - Caracterização Físico-química do RMF

<i>Parâmetro</i>	<i>Teste 1</i>	<i>Teste 2</i>	<i>Teste 3</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão Amostral</i>
<i>pH</i>	7,45	7,5	7,36	7,43	0,06
<i>Porosidade (%)</i>	33,53	34,37	33,92	33,92	0,06
<i>Teor de umidade (%)</i>	12,50	11,60	12,80	12,30	0,01
<i>Massa específica aparente (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</i>	4,674	4,338	4,341	4,451	0,16
<i>Massa específica do meio (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</i>	2,959	2,921	2,945	2,942	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

Em relação aos valores médios, a amostra apresenta pH neutro (7,43), porosidade de 33,92%, massa específica aparente de  $4,451 \text{ g}/\text{cm}^3$  e massa específica do meio de  $2,942 \text{ g}/\text{cm}^3$ . Foi identificado teor médio de umidade de 12,30%, considerado elevado tendo em vista amostras utilizadas por Silva (2014) para ensaio de produção de  $\text{FeCl}_3$ . Desta forma, optou-se para a realização dos ensaios de solubilização (produção do  $\text{FeCl}_3/\text{RMF}$ ), a secagem das amostras em estufa a  $100^\circ\text{C}$  ( $\pm 5^\circ\text{C}$ ) durante 24 horas.

Realizou-se o ensaio de granulometria utilizando 1000g do RMF. Por meio deste teste, obteve-se o percentual em peso que cada faixa específica de tamanho de partículas na massa total ensaiada. Através dos resultados obtidos desse ensaio foi possível analisar a distribuição

granulométrica típicas da amostra. Os resultados são apresentados a seguir na Tabela 12 e Figura 11 respectivamente:

**Tabela 12** - Distribuição granulométrica das amostras do RMF

<i>Granulometria</i>	<i>Peso (g)</i>	<i>Percentual (%)</i>
# 2mm	9,946	0,9
# 1,2 mm	13,23	1,3
#1 mm	4,599	0,4
# 0,6 mm	33,57	3,36
# 0,427 mm	49,71	4,9
# 0,3 mm	107,23	10,7
#0,15 mm	339,65	33,9
# 0,075 mm	323,65	32,37
< # 0,075 mm	118,2	11,8

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).



**Figura 11** - Separação granulométrica do rejeito da mineração de Ferro

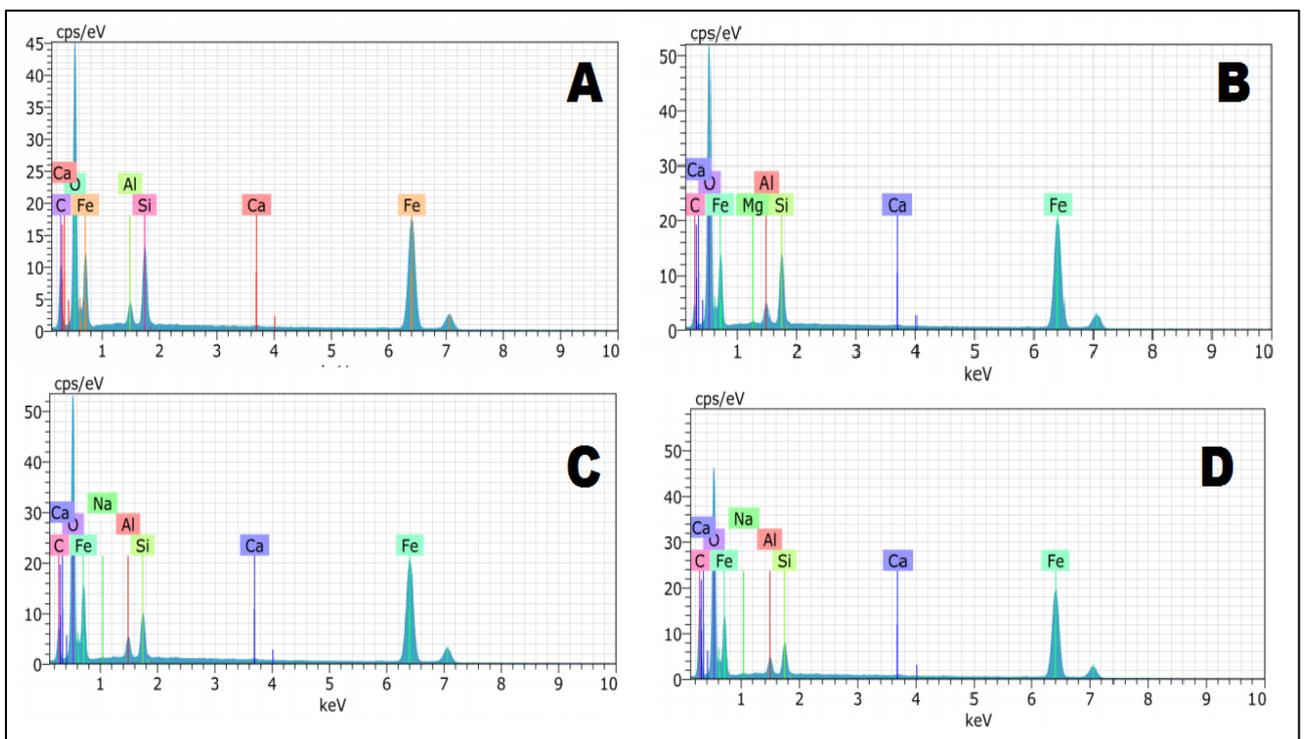
**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2018).

De acordo com os resultados, nota-se que a maior parte da massa total do rejeito se encontra entre as faixas 0,15mm e 0,075mm, representando 66,6% do peso da amostra, podendo assim caracteriza-lo como material de diâmetro fino de acordo com curva de distribuição granulométrica (NBR 7180/1984).

Ressalta-se a caracterização do RMF de acordo com a classificação granulométrica proposta por Wolff (2009) sendo ela: rejeitos grossos ou granulares, maiores do que 0,5 mm; rejeitos finos, com diâmetro abaixo de 0,15mm. Segundo Castro (2002) as partículas menores que 0,075 mm comportam-se como partículas ultrafinas, e possuem aspectos semelhantes aos colóides, e nota-se que 11,8% se enquadra nessa classificação.

## 5.2. Caracterização Química do RMF

A seguir são apresentados os resultados da caracterização química do RMF obtida por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV-EDS) realizada no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da UNIFEI. Foram realizadas ao todo, 4 análises (quadruplicata) (A, B, C e D). A partir desta análise, foi possível gerar gráficos de composição de elementos químicos em percentual presentes no RMF, sendo identificado os seguintes elementos: Fe (Ferro), O (Oxigênio), C (Carbono), Si (Silício), Al (Alumínio), Na (Sódio) e Ca (Cálcio) como exposto na Figura 12 a seguir.



**Figura 12** - Gráficos de composição das 4 amostras do RMF obtidas a partir da análise em MEV-EDS.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir na Tabela 13, são apresentados os resultados da composição química do RMF obtida nos gráficos da análise de MEV-EDS:

**Tabela 13** - Composição química do RMF obtida por meio de análise MEV-EDS

Elemento	Análise				Média
	A	B	C	D	
Fe (%)	52,15	58,6	57,07	51,18	54,75
O (%)	29,37	29,63	30,06	28,51	29,39
C (%)	13,4	6,03	8,55	17,23	11,30
Si (%)	5,09	4,25	2,72	1,84	3,47
Al (%)	1,42	1,27	1,31	0,98	1,24
Mg (%)	-	0,019	-	-	0,019
Na (%)	-	-	0,022	0,018	0,02
Ca (%)	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

De acordo com os resultados, as amostras de RMF possuem teor médio de Fe de 54,75 %, valores próximos aos encontrados em trabalhos desenvolvidos por Gomes, Pereira e Peres (2016) e Ghose e Sen (1999), sendo 67,54% e 48,30% respectivamente. Neste sentido, pode-se observar, que com base na análise MEV, a composição química do RMF apresentou elevado teor de ferro, seguido de altas concentrações de Oxigênio e Carbono. O ponto negativo da análise em MEV é a não identificação de compostos, porém nota-se que a alta composição de Oxigênio podem, juntamente com os altos teores de Fe encontrados, representar o  $Fe_2O_3$  presente na amostra de RMF.

É importante destacar que de acordo com a análise em MEV, não foi identificado nenhum traço de metais pesados tais como mercúrio ou chumbo ou presença expressiva de outro elemento que poderia caracterizar toxicidade às amostras utilizadas.

### 5.3. Produção de Cloreto Férrico

A seguir na Tabela 14 são apresentados os resultados dos ensaios conduzidos para a produção do  $FeCl_3$  /RMF por meio da reação com 4 diferentes soluções de HCl (20%, 60%, 80% e 100%) e 5 g do RMF. Após o tempo de reação de 1 hora, aquecimento à 80°C e agitação constante, foi analisado o volume de solução obtido e bem como o peso do rejeito após a reação.

**Tabela 14** - Volume de FeCl<sub>3</sub> /RMF e peso final de RMF após a reação.

<i>Solução de HCl</i>	<i>% de HCl</i>	<i>HCl em mol/L</i>	<i>Volume Final (mL)</i>	<i>Peso Final (g)</i>
1	20	2,44	38,5	4,85
2	60	7,31	47,4	4,22
3	80	9,74	69,6	3,95
4	100	12,18	81,5	3,04

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

De acordo com os resultados obtidos, nota-se que o volume de solução de FeCl<sub>3</sub> /RMF produzido foi proporcional a concentração de HCl presente na solução. Tal fato se deu pela evaporação da água destilada presente nas soluções de HCl. A título de comparação, a solução a 20% de HCl produziu um volume final de 38,5 mL, e a reação com 100%, volume final de 81 mL. O peso final do RMF foi inversamente proporcional á concentração do HCl, as soluções mais concentradas permitiram melhor rendimento, sendo menor peso final, ou seja boa parte do RMF se solubilizou, e maior volume final. Após a produção do FeCl<sub>3</sub> /RMF foi realizada análises em espectrofotômetro das concentrações obtidas nas 4 diferentes soluções de HCl. As análises foram realizadas em triplicata (Teste 1, 2 e 3) e apresentadas a seguir na Tabela 15:

**Tabela 15** - Concentrações de FeCl<sub>3</sub> obtidas a partir do RMF

<i>Solução de HCl</i>	<i>Teste 1 (mg/L)</i>	<i>Teste 2 (mg/L)</i>	<i>Teste 3 (mg/L)</i>	<i>Concentração Média (mg/L)</i>	<i>Desvio Padrão</i>
1 (20%)	291	287,6	282,7	287,1	3,4
2 (60%)	505,6	498	499,7	501,1	3,2
3 (80%)	635,5	616,8	619,3	623,8	8,2
4 (100%)	840,5	814,2	835,5	830	11,4

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

De acordo com os resultados obtidos, nota-se que as concentrações de FeCl<sub>3</sub> geradas foram proporcionais ás concentrações de HCl. Diante disso, observa-se que além de maior rendimento (relação volume produzido e peso final do RMF), o uso de soluções mais concentradas HCl favoreceram maiores concentrações de FeCl<sub>3</sub> produzidas e tem-se a solução de HCl a 100% como concentração ótima para a solubilização.

A fim de se otimizar a produção e aumento da concentração do FeCl<sub>3</sub>/ RMF, foi analisado a solubilização do RMF a partir da concentração de HCl tomada como ótima (100%) e utilizando 5g do rejeito separado em 8 diferentes granulometrias: # 1,2 mm, #1 mm,

# 0,6 mm, # 0,427 mm, # 0,3 mm, #0,15 mm, # 0,075 mm e > # 0,075 mm. Este teste buscou analisar a influência do uso de diferentes granulometrias e, conseqüentemente, as superfícies de contato disponíveis na solubilização do RMF. Para isso, foram conduzidos os mesmos testes aplicados anteriormente sendo: 1 hora de agitação e aquecimento à 80°C. Após a solubilização, foram analisados o peso do RMF e volume e concentração do coagulante (em triplicata). Os resultados deste teste são apresentados na Tabela 14 a seguir:

**Tabela 16** - Concentrações de FeCl<sub>3</sub> obtidas a partir de diferentes granulometrias e solução de HCl a 100%

<b>Granulometria</b>	<b>Volume Final (mL)</b>	<b>Peso Final (g)</b>	<b>Teste 1 (mg/L)</b>	<b>Teste 2 (mg/L)</b>	<b>Teste 3 (mg/L)</b>	<b>Concentração Média (mg/L)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
# 1,2 mm	82,4	4,98	36	27,1	28,2	30,4	3,9
#1 mm	82	4,99	54,6	62	55,5	57,3	3,2
# 0,6 mm	82,9	4,95	110,5	107	99,5	105,6	4,5
# 0,427 mm	81,5	4,57	501,6	481,4	508,6	497,2	3,5
# 0,3 mm	80,9	4,08	513,6	499,4	503,6	505,5	5,9
#0,15 mm	79,6	3,16	826,5	824,5	836,2	829,0	5,1
# 0,075 mm	77,8	2,81	978,7	988,8	979,4	982,3	4,6
< # 0,075 mm	80,1	2,86	957,5	955,2	951,8	954,8	2,3

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

Observa-se que as menores granulometrias testadas sendo elas, #0,075 e #<0,075 favoreceram a solubilização do RMF e, tal fato, se deve pela maior superfície de contato e diâmetro das partículas disponíveis para reação, justificada pelos pesos finais. Porém em relação ao teste com uso do RMF bruto e concentração a 100%, não houve aumento expressivo da solubilização. Neste caso, pode-se dizer que obteve-se nas granulometrias citadas aumento da concentração de apenas 12,5% e 11,6% respectivamente.

#### 5.4. Ensaios CEPT de bancada

Após a produção do FeCl<sub>3</sub>, foi realizado ensaios CEPT de bancada utilizando *Jar Teste*. No total, foram realizados 20 ensaios sendo: 10 utilizando FeCl<sub>3</sub>/RMF e 10 para o FeCl<sub>3</sub>/Comercial. Para os ensaios com o FeCl<sub>3</sub>/Comercial utilizou-se uma solução à 10mg/mL. Para o FeCl<sub>3</sub>/RMF também utilizou-se uma solução à 10 mg/mL produzida a partir do produto obtido em reação de HCl à 100% e granulometria de RMF de 0,075 mm pois

nestes testes foram obtida melhores solubilidades e melhor concentração como apresentado anteriormente. A seguir são apresentados os resultados do pH e Alcalidade, Turbidez Residual, Sólidos Sedimentáveis, DQO removida e  $P_{total}$  removido após os ensaios com o  $FeCl_3/Comercial$  e o  $FeCl_3/RMF$ .

#### 5.4.1. pH e Alcalinidade

Inicialmente são apresentados na Tabela 17 os valores do pH e Alcalinidade ( $mgCaCO_3/L$ ) do efluente bruto antes da realização dos ensaios CEPT de bancada. De acordo com os valores, o pH variou entre 6,3 e 7,2, obtendo valor médio de 6,79. Segundo os valores obtidos em todos os ensaios, o pH encontrou-se na faixa ótima para reação com o  $FeCl_3$ , sendo ela entre 5,0 e 11,0 (DI BERNADRO e SANTOS NETO, 2005). O pH é uma variável de controle importante em tratamento CEPT utilizando o  $FeCl_3$ , principalmente quando se deseja a precipitação de  $P_{total}$ , e de acordo com os valores obtidos foi dispensável o uso soluções ácidas ou básicas para adequar o valor do pH antes da realização dos ensaios CEPT.

Em relação aos valores da Alcalinidade do efluente bruto durante os ensaios foi obtido um valor mínimo de 39 e máximo de 62  $mgCaCO_3/L$ , e média de 51,9. É possível notar uma relação entre os valores de pH e a alcalinidade, podendo dizer que os maiores valores de alcalinidade foram obtidos em pH's elevados.

**Tabela 17** - pH e Alcalinidade do efluente bruto utilizado no tratamento CEPT

Data	13/7/18	20/7/18	27/7/18	2/8/18	25/8/18	21/9/18	29/9/18	4/10/18	19/10/18	29/10/18
pH	6.67	6.81	6.3	7.2	6.9	6.4	6.8	7.2	7.1	6.59
Alca.*	49	51	39	56	55	45	42	62	55	55

\*  $mgCaCO_3/L$

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir na Tabela 18 são apresentados os valores do pH do efluente e após a aplicação das 5 dosagens diferentes de  $FeCl_3/Comercial$  em ensaio CEPT realizado em *Jar Test*. Nota-se, de acordo com os valores médios obtidos após a aplicação das 5 dosagens que o

pH final foi inversamente proporcional à dosagem aplicado. Assim pode se dizer que quanto maior a concentração utilizada, menor o pH final. Nota-se que grande parte dos valores se encontraram próximos da neutralidade (entre 6,0 e 7,5).

**Tabela 18** - pH do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl<sub>3</sub> Comercial

Data	pH Final - FeCl <sub>3</sub> Comercial				
	50 mg/L	75 mg/L	100 mg/L	125 mg/L	150 mg/L
13/7/18	6.5	6.41	6.41	6.08	5.78
20/7/18	6.35	6.3	6.02	5.84	5.7
27/7/18	6.2	6.15	6.03	5.85	5.5
2/8/18	6.8	6.61	6.45	6.3	6.26
25/8/18	6.71	6.7	6.26	6.01	5.9
21/9/18	6.2	5.9	5.74	5.62	5.6
29/9/18	6.75	6.4	6.1	5.9	5.87
4/10/18	6.8	6.6	6.4	6.2	5.9
19/10/18	6.78	6.45	6.42	6.14	6.04
29/10/18	6.62	6.32	6.1	5.98	5.95
Mínimo	6,2	5,9	5,7	5,8	5,5
Máximo	6,8	6,5	6,4	6,3	6,2
Média	6,4	5,95	5,9	5,5	5,2
Des. Pad.	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir na Tabela 19 são apresentados os valores do pH do efluente e após a aplicação das 5 dosagens diferentes de FeCl<sub>3</sub>/RMF em ensaio CEPT. Assim como o comercial, os valores médios do pH finais das 5 dosagens do FeCl<sub>3</sub>/RMF também foram inversamente proporcional ao volume aplicado. Entretanto nota-se que os valores ficaram abaixo dos valores obtidos pelo Comercial, por exemplo, o pH final médio da menor dosagem (50 mg/L) para o FeCl<sub>3</sub>/Comercial foi 6,2, enquanto que o FeCl<sub>3</sub>/RMF foi 5,1. Na maior dosagem (150 mg/L), o pH final obtido para o comercial foi 5,5 ao passo que FeCl<sub>3</sub>/RMF foi 3,4. É possível afirmar que a diminuição do pH se deu pois, para a produção do FeCl<sub>3</sub>/RMF utilizou-se soluções ácidas de HCl.

A diminuição do pH após a adição do FeCl<sub>3</sub> depende da alcalinidade do efluente bruto. Caso a alcalinidade seja alta a alteração do pH após a aplicação do coagulante será menor (JORDÃO e FIGUEIREDO, 2005). Os valores obtidos da Alcalinidade para o efluente bruto podem ter contribuído para a manutenção dos valores após a aplicação do coagulante.

Em trabalho desenvolvido por Silva (2009), o pH final para dosagens entre 50 e 150 mg/L se mantiveram na neutralidade para alcalinidade próxima a 65 mg/L. Porém foi possível

observar que para as dosagens acima de 300 mg/L, apresentou variação considerável, chegando a atingir um pH mínimo de 2,42. A autora expõe que as dosagens acima de 300 mg/L ocasionaram consumo da alcalinidade total presente no efluente, e conseqüentemente, diminuição do pH.

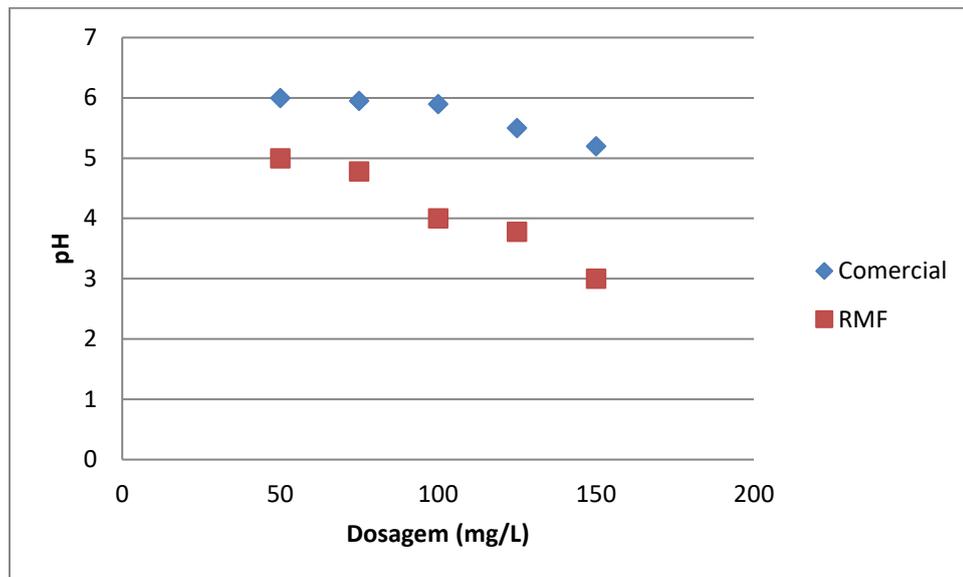
**Tabela 19** - pH do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl<sub>3</sub> /RMF

Data	pH Final - FeCl <sub>3</sub> RMF				
	50 mg/L	75 mg/L	100 mg/L	125 mg/L	150 mg/L
13/7/18	-	-	-	-	-
20/7/18	5.91	5.4	4.6	3.5	3.4
27/7/18	5.7	5.3	4.34	3.9	3.4
2/8/18	5.64	5.18	4.8	4.2	3.84
25/8/18	5.1	4.8	4.5	4.2	3.8
21/9/18	5.25	4.82	4.55	4.01	3.77
29/9/18	5.95	5.1	4.8	4.22	3.9
4/10/18	5.65	5.23	4.9	4.23	3.85
19/10/18	5.8	5.2	4.78	4.2	3.9
29/10/18	5.7	5.2	4.8	4.4	3.9
Mínimo	5.1	4.8	4.34	3.5	3.4
Máximo	5.95	5.4	4.9	4.4	3.9
Média	5	4.7	4.2	3.7	3
Des. Padrão	0.3	0.4	0.5	0.4	0.6

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir o Gráfico 1 é apresentado o gráfico dos valores do pH finais após a aplicação do FeCl<sub>3</sub>/Comercial e do FeCl<sub>3</sub>/RMF. A partir do gráfico, é possível observar a maior variação do pH final do FeCl<sub>3</sub>/RMF em relação ao produto comercial. A variação final proporcionada pelo uso do produto gerado a partir do RMF pode requisitar o uso de produtos com a finalidade de se elevar o pH ao final do tratamento para evitar problemas de corrosão de tubulações e proteção do corpo receptor. Sendo assim, o controle do pH ao final do tratamento utilizando o FeCl<sub>3</sub>/RMF em escala plena deve ser considerado.

É possível observar de acordo com a Gráfico 1 que a aplicação de ambos os produtos houve uma diminuição expressiva, dos valores de pH. Salvo a aplicação de 50 mg/L do FeCl<sub>3</sub>/Comercial, todas as demais médias obtidas da aplicação do produto comercial e obtido a partir do RMF encontram-se fora do intervalo permitido pelos padrões de lançamento de efluentes estabelecidos pela DN Conjunta COPAM-CERH n° 01/2008 para o estado de Minas Gerais (6,0 à 9,0).

**Gráfico 1** - Gráfico do pH do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl<sub>3</sub> / Comercial e o FeCl<sub>3</sub> / RMF

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

#### 5.4.2. Turbidez residual

A seguir na Tabela 20 são apresentados os valores da Turbidez (NTU) efluente bruto antes da realização dos ensaios CEPT de bancada. Segundo os valores obtidos em todos os ensaios, a turbidez variou entre 146 e 240 NTU, e média de 178 NTU.

**Tabela 20** – Valores da Turbidez do efluente bruto utilizado no tratamento CEPT

Data	13/7/18	20/7/18	27/7/18	2/8/18	25/8/18	21/9/18	29/9/18	4/10/18	19/10/18	29/10/18
Turb.*	187	146	198	181	158	201	146.9	198	168	204

\* NTU - *Nephelometric Turbidity Units*

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir na Tabela 21 são apresentados os valores da turbidez residual do efluente após a aplicação das 5 dosagens diferentes de FeCl<sub>3</sub>/Comercial em ensaio CEPT realizado em *Jar Test*. Nota-se de acordo com os valores obtidos que houve redução da turbidez em todas as dosagens aplicadas, sendo os valores mais significativos obtidos para as dosagens de 100 mg/L á 150 mg/L. De acordo com os valores médios do efluente bruto e após o ensaio, a

menor turbidez residual foi alcançada com a aplicação de 125 mg/L, atingindo 98% de remoção com valor residual de 2,7 NTU.

**Tabela 21** - Turbidez do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl<sub>3</sub> /Comercial

Data	Turbidez - FeCl <sub>3</sub> Comercial				
	50 mg/L	75 mg/L	100 mg/L	125 mg/L	150 mg/L
13/7/18	63.2	12.5	11.3	2.74	5.86
20/7/18	48	11.5	10.5	5.6	4.6
27/7/18	53	13.8	11	7.5	8.6
2/8/18	98	14.5	12.5	12	16.5
25/8/18	94	14.5	12.5	12	16.5
21/9/18	94	21	16.3	14	14.6
29/9/18	89	18.9	14.6	9.5	11.5
4/10/18	112	24.3	14	11.2	15.1
19/10/18	106	20.1	12.3	12.8	18.6
29/10/18	94	16	11	13.5	12.5
Mínimo	48	11	10	2,7	4,6
Máximo	112	24	16	14	18
Média	85.1	16.3	12.3	9.7	11.9
Des. Padrão	22	4.2	1.8	3.8	4.8

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir na Tabela 22 são apresentados os valores da Turbidez após aplicação do FeCl<sub>3</sub>/RMF. De acordo com os resultados obteve-se redução satisfatória da Turbidez e similares ao comercial a partir da dosagem de 100 mg/L. A melhor média foi obtida pela concentração de 150 mg/L com valor de 15,5 NTU e redução de 91%. As aplicações das dosagens 50 e 75 mg/L obtiveram valores residuais médios próximos á média do efluente bruto sendo 177,1 e 162,3 NTU sendo possível considerar a eficiência de remoção deste parâmetro nestas dosagens, insignificantes. Desta forma é possível afirmar que a aplicação do coagulante gerado a partir do RMF não é eficiente para remoção de turbidez quando aplicado em concentrações menores que 100 mg/L.

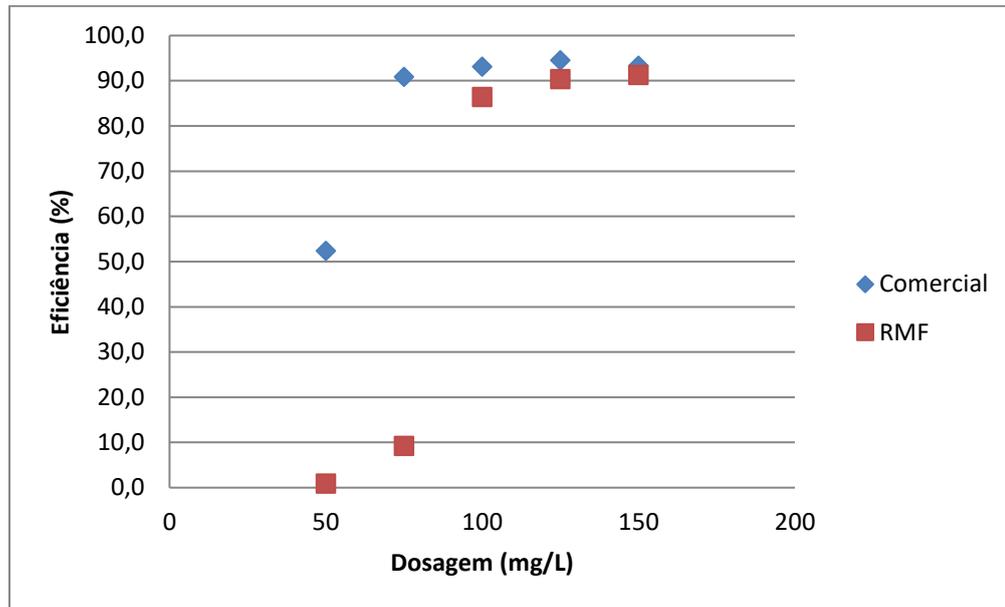
**Tabela 22** – Valores da Turbidez do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl<sub>3</sub>/RMF

Data	Turbidez - FeCl <sub>3</sub> /RMF				
	50 mg/L	75 mg/L	100 mg/L	125 mg/L	150 mg/L
13/7/18	-	-	-	-	-
20/7/18	155	132	26	16	17.8
27/7/18	183	162	35	16.2	15.3
2/8/18	174	146	21.3	14.6	11.2
25/8/18	165	156	15	11	12.5
21/9/18	211	185	21	14	9
29/9/18	159	154	31	23	26
4/10/18	199	194	35	21	23
19/10/18	161	154	41	24	18.6
29/10/18	187	178	14	16	9.5
Mínimo	155	132	18	11	9
Máximo	211	194	35	24	26
Média	177.1	162.3	24.3	17.2	15.5
Des. Padrão	19.3	19.7	5.5	4.4	6

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir o Gráfico 2 é apresentado o gráfico da eficiência de remoção da turbidez do FeCl<sub>3</sub>/Comercial e do FeCl<sub>3</sub>/RMF. A partir do gráfico, é possível observar a similaridade da remoção a Turbidez do FeCl<sub>3</sub>/RMF em relação ao produto comercial a partir das dosagens acima de 100 mg/L.

Porém, a eficiência de remoção deste parâmetro para 100 mg/L e 150 mg/L encontram próximas dos valores obtidos por Silva (2009) para FeCl<sub>3</sub>/Comercial sendo 90% e 93% respectivamente.

**Gráfico 2** - Turbidez do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl<sub>3</sub> / Comercial e o FeCl<sub>3</sub> / RMF

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

#### 5.4.3. Produção de Sólidos Sedimentáveis

A seguir na Tabela 23 são apresentados os valores de Sólidos Sedimentáveis ( $S_{sed}$ ) efluente bruto antes da realização dos ensaios CEPT de bancada. Segundo os valores obtidos em todos os ensaios, os valores de  $S_{sed}$  variaram entre 1,5 mL/L e 3 mL/L e média 2,3 mL/L.

**Tabela 23** - Sólidos Sedimentáveis do efluente bruto utilizado no tratamento CEPT

Data	13/7/18	20/7/18	27/7/18	2/8/18	25/8/18	21/9/18	29/9/18	4/10/18	19/10/18	29/10/18
$S_{sed}$ .* *mL/L	2.5	2	2.8	2.6	1.8	3	1.5	2.4	3.1	2.8

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir na Tabela 24, são apresentados os valores de  $S_{sed}$  após a aplicação das 5 dosagens diferentes de FeCl<sub>3</sub>/Comercial em ensaio CEPT realizado em *Jar Test*. Nota-se de acordo com os valores obtidos que a produção de  $S_{sed}$  foi proporcional às dosagens aplicadas. Os valores significativos foram obtidos entre as dosagens de 125 mg/L á 150 mg/L sendo as médias, 40,4 e 40 mL/L respectivamente. A produção de  $S_{sed}$  após a aplicação das dosagens do coagulante foi inversamente proporcional aos valores obtidos de turbidez final tendo em vista a relação entre estes dois parâmetros. Sendo assim ao passo que há produção de  $S_{sed}$ , há

diminuição da turbidez residual. A produção de  $S_{Sed}$  está relacionada aos mecanismos de coagulação e floculação do tratamento CEPT, após se aplicar o agente coagulante no efluente e este sendo submetido a gradientes de mistura lenta para formação dos flocos, após tempo de sedimentação há o acúmulo de sólidos sedimentáveis, caracterizado neste tipo de tratamento em escala plena como Lodo. Desta forma a boa formação de  $S_{Sed}$  pode expressar a qualidade do tratamento CEPT.

**Tabela 24** -  $S_{Sed}$  do efluente após tratamento CEPT utilizando o  $FeCl_3$  Comercial

Data	Sólidos Sedimentáveis - $FeCl_3$ Comercial				
	50 mg/L	75 mg/L	100 mg/L	125 mg/L	150 mg/L
13/7/18	7.5	33	40	44	46
20/7/18	6.9	28	35	42	43.5
27/7/18	6.2	34.5	30.5	48	45.5
2/8/18	7.9	29.5	45	-	39.5
25/8/18	5.5	19.5	31	32.5	29.6
21/9/18	7.7	23.3	41.2	47.2	48
29/9/18	4.6	17	25.6	28.6	28.5
4/10/18	8.6	19.5	29.5	35.6	30.6
19/10/18	8	20.6	46.3	46.3	48.6
29/10/18	7.6	15.6	42.3	42.3	44.6
Mínimo	4	15	25	28	28
Máximo	8	34	46	48	48
Média	6.5	23.7	36.4	40.4	40
Des. Padrão	1.2	6.8	7.3	7.1	8.0

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

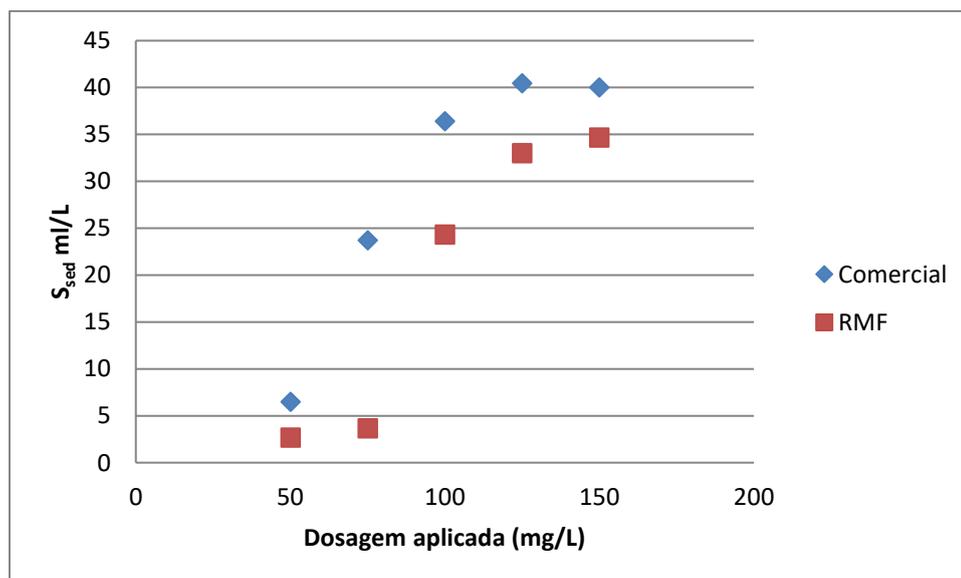
A aplicação do  $FeCl_3$ /RMF (Tabela 25) obteve resultados de produção similares ao comercial a partir da dosagem de 100 mg/L. A melhor média foi obtida pela concentração de 150 mg/L sendo 28 mL/L. As aplicações das dosagens 50 e 75 mg/L obtiveram valores finais médios próximos á média do efluente bruto sendo 2,6 e 3,6 mL/L sendo possível considerar a produção de  $S_{Sed}$  nestas dosagens, insignificantes. Sendo assim, é possível afirmar que a aplicação do coagulante gerado a partir do RMF não é eficiente para a produção de  $S_{Sed}$  quando aplicado em concentrações menores que 100 mg/L.

**Tabela 25** - Ssed do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl<sub>3</sub> /RMF

Data	Sólidos Sedimentáveis - FeCl <sub>3</sub> RMF				
	50 mg/L	75 mg/L	100 mg/L	125 mg/L	150 mg/L
13/7/18	-	-	-	-	-
20/7/18	2.3	4.5	20.6	35.6	32.5
27/7/18	3.1	6.1	18.5	30.6	35.8
2/8/18	2.5	4.5	21.3	25.3	34.2
25/8/18	2	2.6	24	35	36
21/9/18	3	4.2	28	39	41
29/9/18	1.8	2	19.6	31.2	28.6
4/10/18	3.6	3.9	26.9	39.3	35.3
19/10/18	4.8	4.6	28.6	31.3	30.3
29/10/18	4	4.2	35.2	32.6	41.2
Mínimo	1	2	18	25	28
Máximo	4	6	35	39	41
Média	2.6	3.6	24.3	33	34.6
Des. Padrão	1	1.2	5.5	4.5	4.4

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir o Gráfico 3 é apresentado a produção de  $S_{Sed}$  em relação às dosagens aplicadas de FeCl<sub>3</sub>/Comercial e do FeCl<sub>3</sub>/RMF. A partir do gráfico, é possível observar que a produção significativa de  $S_{Sed}$  a partir da aplicação do FeCl<sub>3</sub>/RMF se dá a partir das dosagens acima de 100 mg/L, ao passo que o produto comercial se dá a partir de 75 mg/L.

**Gráfico 3** - Produção de  $S_{Sed}$  do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl<sub>3</sub> / Comercial e o FeCl<sub>3</sub> / RMF

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

#### 5.4.4. Remoção de DQO

Apresenta-se a seguir na Tabela 26 os valores da DQO (mg/L) efluente bruto antes da realização dos ensaios CEPT de bancada. Segundo os valores obtidos em todos os ensaios, os valores de DQO variaram entre 569 e 732 mg/L e média 681 mg/L.

**Tabela 26** - DQO do efluente bruto utilizado no tratamento CEPT

Data	2/8/18	21/9/18	29/9/18	4/10/18	29/10/18
DQO* *mg/L	679.3	702.7	596.0	696.0	732.7

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir na Tabela 27 são apresentados os valores da DQO do efluente após a aplicação das 5 dosagens diferentes de FeCl<sub>3</sub>/Comercial em ensaio CEPT realizado *em Jar Test*. Com base na média dos valores do efluente bruto e após o ensaio CEPT, nota-se que houve redução significativa deste parâmetro a partir da dosagem de 75 mg/L. As dosagens de 125 mg/L e 150 mg/L foram as que obtiveram melhores eficiências de remoção com base nos valores médios, sendo elas 67,1 % e 65,9% respectivamente.

É possível relacionar a produção de S<sub>Sed</sub> obtida nos ensaios e a remoção da DQO nos ensaios com o FeCl<sub>3</sub> Comercial. Com base nos resultados destes parâmetros é possível observar que a aplicação de dosagens que produziram maior volume de S<sub>Sed</sub> obtiveram também menor valor de DQO final.

**Tabela 27** - DQO do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl<sub>3</sub> Comercial

Data	DQO - FeCl <sub>3</sub> Comercial				
	50 mg/L	75 mg/L	100 mg/L	125 mg/L	150 mg/L
2/8/18	622.7	356.0	332.7	299.3	266.0
21/9/18	606.0	349.3	306.0	269.3	276.0
29/9/18	372.7	272.7	266.0	206.0	206.7
4/10/18	372.7	272.7	239.3	216.0	242.7
19/10/18	386.0	249.3	246.0	172.7	209.3
29/10/18	372.7	241.0	169.3	182.7	196.0
Mínimo	372	241	169	172	196
Máximo	622	356	332	299	276
Média	455	256.5	259.6	224	232.5
Des. Padrão	123.3	114.3	57.0	50.0	33.7

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir na Tabela 28 são apresentados os valores da DQO do efluente após a aplicação das 5 dosagens de FeCl<sub>3</sub>/RMF em ensaio CEPT. Com base na média dos valores do efluente bruto e após o ensaio CEPT, nota-se que houve redução significativa deste parâmetro a partir da dosagem de 100 mg/L. A dosagem de 100 mg/L do FeCl<sub>3</sub>/RMF obteve eficiência média semelhante ao FeCl<sub>3</sub>/Comercial sendo 60% e 61,9%. As dosagens de 125 mg/L e 150 mg/L obtiveram as eficiências de 59,4 % e 60,4% respectivamente. Observa-se também que nos ensaios com o FeCl<sub>3</sub>/RMF também é possível relacionar a maior produção de S<sub>Sed</sub> obtida nos ensaios e a remoção da DQO.

**Tabela 28** - DQO do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl<sub>3</sub>/RMF

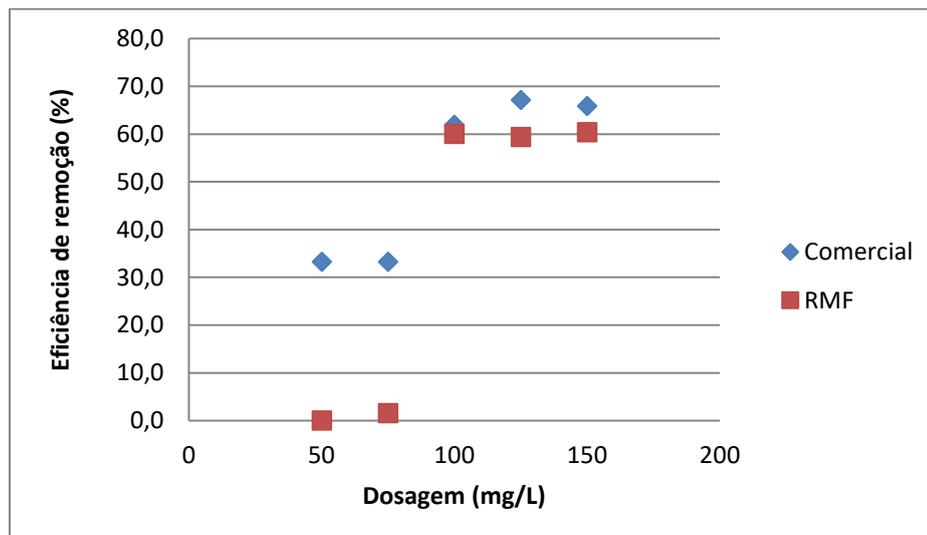
Data	DQO - FeCl <sub>3</sub> RMF				
	50 mg/L	75 mg/L	100 mg/L	125 mg/L	150 mg/L
2/8/18	692.0	669.3	316.0	302.7	306.0
21/9/18	719.0	696.0	296.0	274.3	271.0
29/9/18	699.0	569.3	282.7	235.3	206.4
4/10/18	601.0	689.3	272.7	266.0	272.7
19/10/18	692.0	686.0	299.3	292.7	276.0
29/10/18	729.0	716.0	169.3	292.7	289.3
Mínimo	601	569	169	235	206
Máximo	729	716	316	302	306
Média	688.6	670.8	272.3	276.8	270
Des. Padrão	45.5222	52.1	52.8	24.3	34.0

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir o Gráfico 4 são apresentadas as eficiências de remoção da DQO em relação às dosagens aplicadas de  $\text{FeCl}_3$ /Comercial e do  $\text{FeCl}_3$ /RMF. A partir do gráfico, é possível observar que a remoção significativa da DQO utilizando o  $\text{FeCl}_3$ /RMF ocorre a partir da dosagem de 100 mg/L, ao passo que o produto comercial se dá a partir de 50 mg/L. As eficiências de remoção para ambos produtos a partir da dosagem de 100 mg/L se encontram próximas aos valores típicos de remoção da DQO em CEPT utilizando  $\text{FeCl}_3$  expostos por Jordão e Pessoa (2011) e para tratamento CEPT, sendo entre 55% e 75%.

Em relação aos valores dispostos na DN Conjunta COPAM-CERH n° 01/2008 para este parâmetro de qualidade, apesar de ter ocorrido expressiva eficiência de remoção por meio aplicação de ambos os produtos a partir das concentrações de 100 mg/L, os valores médios permaneceram acima do permitido para lançamento em corpos de água pela legislação estadual, sendo  $\leq 180$  mg/L.

**Gráfico 4** - Eficiência de remoção da DQO após tratamento CEPT utilizando o  $\text{FeCl}_3$  / Comercial e o  $\text{FeCl}_3$  / RMF



Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

#### 5.4.5. Remoção de $P_{\text{total}}$

Apresenta-se a seguir na Tabela 29 os valores da  $P_{\text{total}}$  (mg/L) efluente bruto antes da realização dos ensaios CEPT de bancada. Segundo os valores obtidos em todos os ensaios, os valores de  $P_{\text{total}}$  variaram entre 4,33 e 8,33 mg/L e média 6,8 mg/L. Boa parte dos valores obtidos se encontraram dentro dos valores típicos de concentração de  $P_{\text{total}}$  nos esgotos

sanitários, sendo 5mg/L a 20 mg/L (METCALF & EDDY, 2016; JORDÃO E PESSÔA, 2014; LEME, 2014).

**Tabela 29** - P<sub>total</sub> do efluente bruto utilizado no tratamento CEPT

<b>Data</b>	2/8/18	25/8/18	21/9/18	29/9/18	29/10/18
<b>P<sub>total</sub>* *mg/L</b>	<b>4.33</b>	<b>7.50</b>	<b>6.17</b>	<b>8.33</b>	<b>7.67</b>

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir na Tabela 30 são apresentados os valores P<sub>total</sub> (mg/L) do efluente após a aplicação das 5 dosagens diferentes de FeCl<sub>3</sub>/Comercial em ensaio CEPT realizado *em Jar Test*. Com base na média dos valores do efluente bruto e após o ensaio CEPT, nota-se que houve redução deste parâmetro a partir da dosagem de 75 mg/L. As eficiências de remoção com base nos valores médios para as dosagens de 75 mg/L, 125 mg/L e 150 mg/L foram 78,4%, 88,3%, 89,3% e 91,8% respectivamente.

Sobre as eficiências obtidas, é possível relacionar também a produção de S<sub>Sed</sub> obtida nos ensaios e a remoção de P<sub>total</sub> final. A aplicação do FeCl<sub>3</sub> no CEPT e bem como os mecanismos de coagulação e floculação deste tratamento promovem a precipitação do P<sub>total</sub> presente no efluente e que por sua vez, estará presente no Lodo (S<sub>Sed</sub>). Sendo assim, é possível afirmar que a boa formação de S<sub>Sed</sub> obtidas nos ensaios pode representam a precipitação do P<sub>total</sub> nas dosagens 75, 125 e 150 mg/L.

**Tabela 30** - P<sub>total</sub> do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl<sub>3</sub> Comercial

Data	<b>P Total - FeCl<sub>3</sub> Comercial</b>				
	<b>50 mL</b>	<b>75 mL</b>	<b>100 mL</b>	<b>125 mL</b>	<b>150 mL</b>
2/8/18	4.17	1.00	0.67	0.67	0.50
25/8/18	4.50	2.83	0.83	0.82	0.17
21/9/18	5.67	1.17	0.83	0.50	0.63
29/9/18	4.83	1.17	0.83	0.75	0.78
29/10/18	2.33	1.17	0.83	0.90	0.70
Mínimo	2.33	1	0.67	0.5	0.17
Máximo	5.67	2.83	0.83	0.9	0.78
Média	4.3	1.468	0.798	0.728	0.556
Des. Padrão	1.2345	0.7649	0.0716	0.1532	0.239

**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir na Tabela 31 são apresentados os valores de  $P_{total}$  (mg/L) do efluente após a aplicação das 5 dosagens de  $FeCl_3/RMF$  em ensaio CEPT. Assim como análise da DQO e com base na média dos valores do efluente bruto e após o ensaio CEPT, nota-se que houve redução significativa deste parâmetro a partir da dosagem de 100 mg/L. As dosagens de 100, 125 e 150 mg/L do  $FeCl_3/RMF$  obtiveram eficiências de 74 %, 81,4% e 79,4 % respectivamente. É possível relacionar também a aplicação do  $FeCl_3/RMF$  no ensaio CEPT de bancada, a remoção do  $P_{total}$  e a produção de  $S_{Sed}$

**Tabela 31** -  $P_{total}$  do efluente após tratamento CEPT utilizando o  $FeCl_3$  RMF

Data	<b>P Total - <math>FeCl_3</math> RMF</b>				
	<b>50 mg/L</b>	<b>75 mg/L</b>	<b>100 mg/L</b>	<b>125 mg/L</b>	<b>150 mg/L</b>
2/8/18	4.33	4.00	1.17	1.00	1.50
25/8/18	7.00	5.83	1.83	1.50	1.50
21/9/18	6.00	5.67	1.67	1.50	1.33
29/9/18	8.00	7.33	1.83	1.17	1.67
29/10/18	7.33	6.33	2.33	1.17	1.00
Mínimo	4.33	4	1.17	1	1
Máximo	8	7.33	2.33	1.5	1.67
Média	6.532	5.832	1.766	1.268	1.4
Des. Padrão	1.4268	1.2119	0.4155	0.2229	0.2539

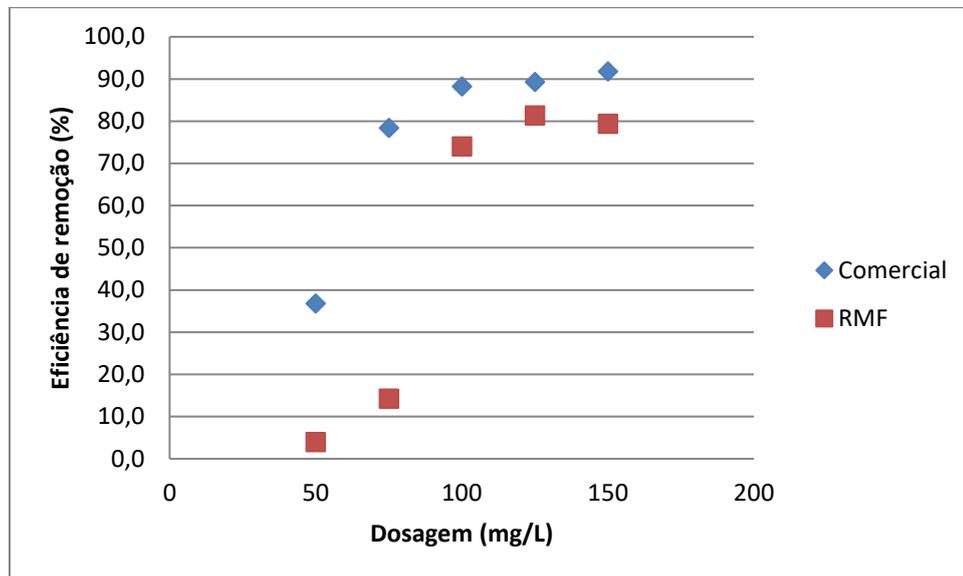
**Fonte:** Elaborado pelo autor, (2019).

A seguir o Gráfico 5 é apresentado a eficiência de remoção da  $P_{total}$  (mg/L) em relação às dosagens aplicadas de  $FeCl_3/Comercial$  e do  $FeCl_3/RMF$ . A partir do gráfico, é possível observar que a remoção significativa do  $P_{total}$  utilizando o  $FeCl_3/RMF$  ocorre a partir da dosagem de 100 mg/L e para o produto comercial ocorre a partir da menor dosagem, 50 mg/L.

O estado de Minas Gerais, por meio da na DN Conjunta COPAM-CERH n° 01/2008 (MINAS GERAIS, 2008), não determina valores máximos para o lançamento de efluentes para este parâmetro de qualidade. Porém de acordo com valores obtidos na literatura, as eficiências de remoção para ambos produtos a partir da dosagem de 100 mg/L se encontram acima aos valores típicos de remoção da DQO em CEPT utilizando  $FeCl_3$  expostos por Jordão e Pessoa (2014) e Manzoni *et al.*, 2014 para tratamento CEPT, sendo entre 55% e 75% e, 60% e 65% respectivamente.

É importante destacar que as eficiências alcançaram a faixa de valores típicos obtidos por sistemas capazes de remover este composto como o tratamento por Adsorção e *Wetlands*. Nestes tratamentos é possível remover entre 75% e 90% e, 65% 99%.

**Gráfico 5** - Eficiência de remoção de P total do efluente após tratamento CEPT utilizando o FeCl<sub>3</sub> / Comercial e o FeCl<sub>3</sub> / RMF



Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

### 5.5. Análise de Ecotoxicidade

Para os ensaios de ecotoxicidade com microcurstáceos *Daphinea magna* utilizou-se os efluentes após os ensaios CEPT com FeCl<sub>3</sub>/Comercial e FeCl<sub>3</sub>/RMF. Tendo em vista a eficiência significativa e similar de ambos os produtos para P<sub>total</sub> e DQO a partir da dosagem de 100 mg/L, optou-se por utilizar o efluente após a aplicação dessa concentração neste teste.

Foram realizados testes com 4 concentrações diferentes sendo sem diluição (100% do efluente), e diluídas em 50 mL água de cultivo à 75%, 50% e 25% de acordo com norma. Foram dispostos 10 organismos (*Daphinea magna*) em cada recipiente. Os testes foram executados em triplicata, ou seja, 30 organismos para cada diluição. Após 48 horas observou-se a letalidade em cada um deles, contando o número de indivíduos mortos ou imóveis. A partir desta contagem calculou-se a CE50 por meio do *Software*.

Os resultados de letalidade bem como o cálculo da CE50 são apresentados na Tabela 32 a seguir:

**Tabela 32** - Contagem de letalidade resultado da CE50

		<b>Letalidade</b>					
		<b>Béquer</b>	<b>Controle</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
FeCl <sub>3</sub> /Comercial (100 mg/L)	1	0	1	1	2	2	
	2	0	0	2	3	3	
	3	0	1	1	2	4	
	Total	0	2	4	7	9	
	<b>CE50</b>	<b>70 mg/L</b>					
		<b>Letalidade</b>					
		<b>Béquer</b>	<b>Controle</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
FeCl <sub>3</sub> /RMF (100 mg/L)	1	0	0	1	2	4	
	2	0	1	1	2	3	
	3	0	1	2	4	3	
	Total	0	2	4	8	10	
	<b>CE50</b>	<b>66,7 mg/L</b>					

Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

De acordo com a ocorrência de letalidade em cada diluição observa-se que o número de indivíduos mortos nas concentrações de 25% e 50 % foram idênticos para ambos os produtos, sendo 2 e 4 respectivamente. Nas concentrações de 75% e 100%, o número de indivíduos mortos para o FeCl<sub>3</sub>/Comercial foi 7 e 9 respectivamente. Para o FeCl<sub>3</sub>/RMF foi contabilizado 8 e 10 indivíduos mortos para 75% e 100% respectivamente.

Com base nos valores, a Concentração Efetiva de efeito agudo de letalidade a 50% dos organismos (CE50) obtida foi 70 mg/L para o FeCl<sub>3</sub>/Comercial e 66.7 mg/L para o FeCl<sub>3</sub>/RMF. Nota-se que as concentrações da CE50 de ambos os produtos foram próximas, sendo necessário apenas 3,3 mg/L a mais do produto comercial para alcançar o efeito agudo a 50% dos organismos.

Sendo assim, pode-se dizer que o FeCl<sub>3</sub>/RMF não possui ecotoxicidade diferente do produto comercial. Ressalta-se também durante o processo de produção a partir do RMF possivelmente não foi gerado nenhum subproduto que confere ecotoxicidade ao FeCl<sub>3</sub>/RMF.

Tal fato confirma a ausência de elementos tóxicos nas análises em MEV do RMF.

## 6. CONCLUSÃO

Sobre a produção do  $\text{FeCl}_3$  /RMF observou-se que as soluções mais concentradas de HCl (%) permitiram melhor rendimento considerando a solubilização do RMF, maior volume final após a reação e concentração de  $\text{FeCl}_3$ . Desta forma tomou-se a solução de HCl a 100% como concentração ótima para a solubilização com base nos critérios citados acima.

Foi analisado a influência de diferentes granulometrias e conseqüentemente, as superfícies de contato disponíveis no RMF na solubilização e produção do  $\text{FeCl}_3$  a partir da concentração ótima (100%) de HCl. Com base nestes testes, observou-se que as menores granulometrias testadas sendo elas, #0,075 e >#0,075 favoreceram a solubilização do RMF porém em relação ao teste com uso do RMF bruto e concentração a 100%, não houve aumento expressivo da solubilização. Neste caso, de acordo com os resultados obtidos pode-se dizer que se obteve nas granulometrias citadas aumento da concentração de apenas 12,5% e 11,6% respectivamente.

Em relação à aplicação do  $\text{FeCl}_3$ /RMF nos ensaios *Jar Teste*, observou-se que o pH final das 5 dosagens do  $\text{FeCl}_3$ /RMF foram inversamente proporcionais às concentrações aplicadas. Entretanto nota-se que os valores ficaram abaixo dos valores obtidos pelo Comercial. É possível afirmar que a diminuição do pH se deu pois, para a produção do  $\text{FeCl}_3$ /RMF utilizou-se solução ácida de HCl. Em relação à remoção turbidez, o  $\text{FeCl}_3$ /RMF obteve redução satisfatória deste parâmetro sendo como similares ao comercial a partir da dosagem de 100 mg/L. Porém notou-se que a redução da Turbidez foi insignificante nas dosagens 50 e 75 mg/L, obtendo valores residuais médios próximos à média do efluente bruto.

Em relação a geração de  $S_{\text{Sed}}$ , o  $\text{FeCl}_3$ /RMF obteve resultados finais deste parâmetro similares ao comercial também somente a partir da dosagem de 100 mg/L. A dosagem de 100 mg/L do  $\text{FeCl}_3$ /RMF obteve eficiência média semelhante ao  $\text{FeCl}_3$ /Comercial sendo 60% e 61,9% respectivamente. As dosagens de 125 mg/L e 150 mg/L obtiveram as eficiências de 59,4 % e 60,4% respectivamente, próximas a concentração de 100 mg/L. Observa-se nos ensaios com o  $\text{FeCl}_3$ /RMF que é possível relacionar a maior produção de  $S_{\text{Sed}}$  obtida nos ensaios e a remoção da DQO ou seja, a aplicação de dosagens que produziram maior volume de  $S_{\text{Sed}}$  obtiveram também menor valor de DQO final.

Assim como análise da DQO e com base na média dos valores do efluente bruto e após o ensaio CEPT, nota-se que houve redução significativa de  $P_{\text{total}}$  a partir da dosagem de

100 mg/L. As dosagens de 100, 125 e 150 mg/L do  $\text{FeCl}_3$ /RMF obtiveram eficiências de 74 %, 81,4% e 79,4 % respectivamente, sendo similares ao  $\text{FeCl}_3$ /Comercial.

Em relação às análises de ecotoxicidade é possível dizer que o  $\text{FeCl}_3$ /RMF possui CE50 similar ao  $\text{FeCl}_3$ /Comercial. É possível dizer que durante o processo de produção a partir do RMF não foi gerado nenhum subproduto que confere ecotoxicidade ao  $\text{FeCl}_3$ /RMF, confirmando a ausência de elementos tóxicos nas análises em MEV-EDS do rejeito.

Com base nos resultados obtidos em todos os testes, observa-se que é possível gerar  $\text{FeCl}_3$  a partir do RMF. Sua aplicação obtém eficiência de remoção similar de parâmetros importantes no tratamento de efluente como DQO e  $P_{\text{total}}$  ao produto comercial. Ressalta-se ainda que a ecotoxicidade similar ao produto comercial representa uma condição favorável a sua produção.

## 7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos, recomenda-se para trabalhos futuros a análise dos seguintes pontos:

- Analise da viabilidade da produção do  $\text{FeCl}_3/\text{RMF}$  em larga escala visando o desenvolvimento de plantas industriais para este fim considerando aspectos tais como: custos de unidades de tratamento, volume de RMF disponível para produção e teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  presente na amostra;
- A aplicação do  $\text{FeCl}_3/\text{RMF}$  em caráter experimental nos processos CEPT em escala piloto, substituindo o  $\text{FeCl}_3/\text{Comercial}$ ;
- Analisar se nos demais processos de extração e beneficiamento do RMF é possível encontrar a presença de metais pesados ou subprodutos tóxicos que inviabilizem a produção do  $\text{FeCl}_3/\text{RMF}$ ;
- Analisar a possibilidade de aplicação do  $\text{FeCl}_3/\text{RMF}$  em outros processos onde seu uso seja necessário tais como tratamento superficial de metais na indústria siderúrgica.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Métodos de Ensaio 6457/7180. **Determinação De Teor de umidade, porosidade granulometria e massa específica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro: 2016.
- ARAGÃO, M. A., ARAÚJO, R. P. A. **Ecotoxicologia Aquática – Princípios e Aplicações.** São Carlos: RIMA. p. 117-152, 2008
- ASTM, D 3838 -80. **Test Method for pH.** USA, 1999.
- AJAKA, E. O. *Recovering fine iron minerals from Itakpe iron ore process tailing.* **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.** Akure, Nigeria, v. 4, n. 9, p. 17-28, nov. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ‘**NBR 12.209 – Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário**’. Rio de Janeiro, Brasil, 1990.
- BRASIL (2011). Norma Brasileira nº 12.209 de 24 de dezembro de 2011. **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários.** Agência Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro RJ. 2011.
- BRASIL (2019) - Resolução Nº 6, de 2 de Abril de 2019 - Ministério de Minas e Energia/Agência Nacional de Mineração - DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO Ed. 64, Seção 1, Pg 41.
- BRASIL (2010) - Lei Nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010. **Política Nacional de Segurança de Barragens / Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.** Altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000.
- BRASIL (2017) - Portaria Nº 70.389, de 17 de Maio de 2017, Cadastro Nacional de Barragens de Mineração DNPM – Ministério de Minas e Energia – 17 de maio de 2017
- CASSINI, S.T. (Coor). **Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento de Biogás**’. Rio de Janeiro, v1. ABES, RIMA. 2003.
- CASTRO, E. B. **Influência de finos na flotação do minério de ferro: efeitos da granulometria e da mineralogia.** Dissertação de M. Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. 2002
- CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores Anaeróbios.** Vol. 5, 2ª Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA - UFMG. 2007.

COVENTYA. Q. Química Ltda. **Water Care: Coagulação e Floculação**. 1ed Diadema, São Paulo, 360p - 2014.

SILVA, C. V. A. **Remoção de Fósforo em Estações Compactas de Estações de Tratamento de Esgotos através de Precipitação Química**. Vitória. Dissertação de Mestrado - Programa de Pos-Graduação em Engenharia Ambiental, UFES 2009.

DE FEO, G; DE GISI, S; GALASSO, M. *Definition of a practical multi-criteria procedure for selecting the best coagulant in a chemically assisted primary sedimentation process for the treatment of urban wastewater*. Desalination, v. 230, n. 1-3, p. 229-238, 2008.

CARDOSO, K.C.; BERGAMASCO, R.; COSSICH, E.S.; MORAES, L.C.K. **Otimização dos tempos de mistura e decantação no processo de coagulação/floculação da água bruta**. Acta Scientiarum Technology, Maringá, v. 30, n. 2, p. 193-198. 2017

DIAS, S. L. P.; VAGHETTI J. C. P; LIMA E. C.; BRASIL J. L.; PAVAN F. A. **Química Analítica: Teoria e Prática Essenciais**. 1ª Ed, 392p, 2016.

DI BERNARDO, L., DI BERNARDO, A. e CENTURIONE F, P. L. **Ensaio de Tratabilidade de Água e Resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Carlos: RIMA, 2002.

DI BERNARDO, L. PAZ. S. L P. **Seleção de Técnicas de Tratamento de Água**. Vol 1- 1 ed. São Carlos. LDIBE. 1538 p - 2008

DONG, Q.; PARKER, W.; DAGNEW, M. *Impact of FeCl<sub>3</sub> dosing on AnMBR treatment of municipal wastewater*. Water research, v. 80, p. 281-293, 2015.

FERNANDA, F. **Estudo de Viabilidade de Recuperação de Rejeito de Mineração de Ferro em Barragens** - Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas UFOP - Ouro Preto – MG, 2014.

GHOSE, M. K.; SEN, P. K. *Recovery of usable ore fines from iron ore tailings and their environmental management – a case study*. Land Contamination & Reclamation, London, v. 7, n. 2, p. 143-149, 1999.

GOMES, N. C., DOS SANTOS, R. K., CORDEIRO, J., DUARTE, M. B. A., QUINTÃO, P. L., & Cordeiro, J. L. **Caracterização das barragens de contenção de rejeitos situadas no estado de Minas Gerais**. Research, Society and Development, v. 8, n. 2, p. 4382683, 2019.

GONG, W., LUO, L., LI, W., LUO, X., LIANG, H., NGO, H., & GUO, W. *Using Chemically Enhanced Primary Treatment (CEPT) as a Pretreatment Option for Anaerobic*

*Digestate from Cattle Manure Digestion System. Water*, v. 9, n. 7, p. 487, 2017.

HONGTAO W., FENGTING L., ARTURO A. KELLER R. *Chemically enhanced primary treatment (CEPT) for removal of carbon and nutrients from municipal wastewater treatment plants: a case study of Shanghai Water Science & Technology*, London, n 60, n.2, 456p, 2009.

FIGUEIREDO I., C., **Avaliação de Desempenho do Processo CEPT no Tratamento Primário de Esgotos Domésticos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

ISO (International Organization For Standardization). *Water Quality - Determination of the Inhibition of the Mobility of Daphnia magna*. International Standard, ISO, 6341. 1982

JORDÃO, E. P. e FIGUEIREDO, I. C. *Chemical Enhanced Primary Treatment – Pilot Investigation and Case Studies in Brazil*. In: 76th WEFTEC – WEF Conference, 2005, Washington, USA. CD Rom. Alexandria, VA, USA: WEF, 2005.

JORDÃO, E.P; PESSÔA, C.A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES - 1050p., 2014,

JU, F., WANG, Y., LAU, F. T., FUNG, W. C., HUANG, D., XIA, Y., & ZHANG, T. *Anaerobic digestion of chemically enhanced primary treatment (CEPT) sludge and the microbial community structure*. *Applied microbiology and biotechnology*, v. 100, n. 20, p. 8975-8982, 2016.

GOMES, M. A., PEREIRA, A. P., PERES A. E. C. **Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro**. Revista. Escola de. Minas, Ouro Preto, v.64(2), 233-236p, abr. jun. 2011

HAO, X., WEI, J., VAN LOODRESCHT, M. C., & CAO, D. *Analysing the mechanisms of sludge digestion enhanced by iron*. *Water research*, v. 117, p. 58-67, 2017.

HAYDAR, S; AZIZ, J. A. *Characterization and treatability studies of tannery wastewater using chemically enhanced primary treatment (CEPT)—a case study of Saddiq Leather Works*. *Journal of Hazardous Materials*, v. 163, n. 2-3, p. 1076-1083, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Gestão e manejo de rejeitos de mineração**. 1<sup>a</sup> ed. Brasília: IBRAM, 2016. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf> Acesso: 15/03/2019

LAMBERTINI, A. C. F., OBERDICK C. S. **Itabira e o Vale do Ribeirão do Peixe – Uma proposta de metodologia automatizada para motigação de riscos**. Anais XXX – SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS - Foz do Iguaçu – PR, 2015.

- LEME, E. J. DE A. **Manual prático de tratamento de águas residuárias**. 2. ed. São Carlos. 2014.
- LI, Y., PARK, S. Y., & ZHU, J. *Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste*. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 15, n. 1, p. 821-826, 2011.
- MANZONI M. M., QUEIROZ Z. L., GUERRA V., J., QUEIROZ, M. I., & JACOB L., E. A **tecnologia de remoção de fósforo: Gerenciamento do elemento em resíduos industriais**. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 9, n. 3, 2014.
- MAGNAN, R. B. - **Análise da viabilidade técnica e financeira da substituição do coagulante cloreto férrico por policloreto de alumínio durante o processo físico-químico no tratamento de efluente de abatedouro avícola** - Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Ambiental - Universidade de Passo Fundo – Passo Fundo, MG, 2010.
- METCALF L. EDDY H. P., **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5ed., McGraw-Hill, 2016.
- MENEZES, J. C. S. S. **Produção de Coagulantes Férricos na mineração de carvão**. Tese de doutorado – Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas - UFRGS – Porto Alegre. 2009
- MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM. Processo/PA/No 119/1986/2003 [Companhia Vale do Rio Doce]. Belo Horizonte: FEAM, 2004.
- MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 1, de 05 de Maio de 2008**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte: *Conselho de Política Ambiental de Minas Gerais – COPAM e Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH*, 2008.
- NIU, X. LI, X. ZHAO, J. REN, Y. YANG, Y *Preparation and coagulation efficiency of polialuminium ferric silicate ferric composite coagulant from wastewater*. *Journal of Environmental Science*. 23 ed, 1122-1128. 2011
- ODEGAARD, H. *Norwegian Experiences with Chemical Treatment of Raw Wastewater*. *Water Science Technology*, London, Vol. 25, n. 12, 255-264p. 1992.
- PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. Belo Horizonte, Dissertação de mestrado em Geotecnia e Transportes, UFMG, 154 p, 2013.
- MARTINI R. J.; CAETANO T. R. C.; SANTOS H. A.; ARANHA P. R. A. **Deposição de rejeitos de minério de ferro em reservatórios: uma aplicação do método GPR** - Revista. *Ambiente e Água*, Taubaté, vol. 11 n. 4, 2016.

MARGUTI, A. L.; FERREIRA FILHO, S. S.; PIVELI, R. P. *Physical-chemical process optimization for phosphorus removal from domestic wastewater by chemical precipitation with ferric chloride*. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 13, n. 4, p. 395-404, 2008.

NENOV, V., *TSS/BOD Removal Efficiency and Cost Comparison of Chemical and Biological Wastewater Treatment*, *Water Science and Technology*, Vol. 32, N° 4, pp 207-214, 1995.

PARK, C. M., & NOVAK, J. T. *The effect of direct addition of iron (III) on anaerobic digestion efficiency and odor causing compounds*. *Water Science and Technology*, v. 68, n. 11, p. 2391-2396, 2013.

SANTOS NETO, J. V. **Filtração terciária precedida de coagulação – floculação para remoção de turbidez e fósforo do efluente de uma ETE UASB + BFs**. Vitoria, ES. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. 2004

SILVA R. G. **Produção de Coagulante Cloreto Férrico a partir de Carepa da Indústria Siderúrgica** – Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – UFRS – Porto Alegre, 2014.

SENA, J.A.; PAIVA, J.G.; BEZERRA, D.P.; OLIVEIRA, N.P.M.; FÔNSCECA, K.C.; SENA, M.M.S. **Análise Quantitativa de Ferro 3+ em solo para plantio**. *Anais. 55° Congresso Brasileiro de Química* – Goiás, 2015.

APHA, AWWA, WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th ed. 2005.

TSUKAMOTO, R. Y. **Tratamento Primário Avançado: O Paradigma Moderno do Tratamento de Esgotos**. *Revista Água Latino Americana*, São Paulo, Vol. 02, n. 04. 2002.

WANG, Y.; Han, T.; XU, Z.; BAO, G.; ZHU, T. *Optimization of phosphorus removal from secondary effluent using simplex method in Tianjin, China*. *Journal of Hazardous Materials*, Whashington, n 121, p.183-186, 2005.

WIKIPEDIA. Informações do município de Itabira - MG. Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Itabira> >. Acesso em: 14 jun. 2018.

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale**. Dissertação de M.Sc., UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil. 2009

USP – **Ficha de informações de segurança de produtos químicos** – FISPQ – Departamento

de Química – São Paulo, 2011.

VALE. **Imagens barragens de localizadas no município de Itabira - MG.** Disponível em: <[http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes\\_itabira/Paginas/Entenda-as-barragens-da-Vale.aspx](http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_itabira/Paginas/Entenda-as-barragens-da-Vale.aspx)>. Acesso em: 20 mar. 2019.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3<sup>a</sup> ed. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005. 452p.

YOSHIDA, F. **Remoção de material orgânica e fósforo de efluente de tratamento anaeróbio por processo físico químico** – Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica – USP, São Paulo. 2005

ZHAO, Q; ZHONG H., WANG, K; WEI, L; LIU, J; YU, K. **Removal and transformation of organic matters in domestic wastewater during lab-scale chemically enhanced primary treatment** *Journal of Environmental Sciences*, New Jersey, vol. 25, n 123, p 59-681, 2013.

## APÊNDICES

APÊNDICE 1 – Resultados CEPT bancada – FeCl<sub>3</sub> comercial

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
1	12/07/2018	13/07/2018

Jarro	Conc (mg/L)	pH	S. Sed mL/L	Turb. (UNT)
1	50	6.5	7.5	63.2
2	75	6.41	33	12.5
3	100	6.17	40	11.3
4	125	6.08	44	2.74
5	150	5.78	46	5.86
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.67</b>	<b>2.5</b>	<b>187</b>

---

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
2	19/07/2018	20/07/2018

Jarro	Conc. (mg/L)	pH	S. sed mL/L	Turb. (UNT)
1	50	6.35	6.9	48
2	75	6.3	28	11.5
3	100	6.02	35	10.5
4	125	5.84	42	5.6
5	150	5.7	43.5	4.6
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.81</b>	<b>2</b>	<b>146</b>

---

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
3	26/07/2018	27/07/2018

Jarro	Conc. (mg/L)	pH	S. Sed. mL/L	Turbidez (UNT)
1	50	6.2	6.2	53
2	75	6.15	34.5	13.8
3	100	6.03	30.5	11
4	125	5.85	48	7.5
5	150	5.5	45.5	8.6
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.3</b>	<b>2.8</b>	<b>198</b>

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
4	02/08/2018	02/08/2018

Jarro	Conc. (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L	Turbidez (UNT)
1	50	6.8	7.9	98
2	75	6.61	29.5	14.5
3	100	6.45	45	12.5
4	125	6.3		12
5	150	6.26	39.5	16.5
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>7.2</b>	<b>2.6</b>	<b>181</b>

DQO (mg/L)	P Total (mgP/L)
622.7	4.2
356.0	1.0
332.7	0.7
299.3	0.7
266.0	0.5
<b>679.3</b>	<b>4.3</b>

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
5	25/08/2018	25/08/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L
1	50	6.71	5.5
2	75	6.7	19.5
3	100	6.26	31
4	125	6.01	32.5
5	150	5.9	29.6
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.9</b>	<b>1.8</b>

Turbidez (UNT)	Fósforo (mgP/L)
94	4.5
14.5	2.8
12.5	0.8
12	0.8
16.5	0.2
<b>158</b>	<b>7.5</b>

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
6	20/09/2018	21/09/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L
1	50	6.2	7.7
2	75	5.9	23.3
3	100	5.74	41.2
4	125	5.62	47.2
5	150	5.6	48
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.4</b>	<b>3</b>

Turbidez (UNT)	DQO total (mg/L)	P (mgP/L)
94	606.0	5.7
21	349.3	1.2
16.3	306.0	0.8
14	269.3	0.5
14.6	276.0	0.6
<b>201</b>	<b>702.7</b>	<b>6.2</b>

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
7	27/09/2018	29/09/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L
1	50	6.75	4.6
2	75	6.4	17
3	100	6.1	25.6
4	125	5.9	28.6
5	150	5.87	28.5
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.8</b>	<b>1.5</b>

Turbidez (UNT)	DQO total (mg/L)	P (mgP/L)
89	372.7	4.8
18.9	272.7	1.2
14.6	266.0	0.8
9.5	206.0	0.8
11.5	206.7	0.8
<b>146.9</b>	<b>596.0</b>	<b>8.3</b>

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
8	04/10/2018	04/10/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L
1	50	6.8	8.6
2	75	6.6	19.5
3	100	6.4	29.5
4	125	6.2	35.6
5	150	5.9	30.6
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>7.2</b>	<b>2.4</b>

Turbidez (UNT)	DQO total (mg/L)
112	372.7
24.3	272.7
14	239.3
11.2	216.0
15.1	242.7
<b>198</b>	<b>696.0</b>

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
9	18/10/2018	19/10/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L
1	50	6.78	8
2	75	6.45	20.6
3	100	6.42	39.6
4	125	6.14	46.3
5	150	6.04	48.6
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>7.1</b>	<b>3.1</b>

Turbidez (UNT)	DQO total (mg/L)
106	386.0
20.1	249.3
12.3	246.0
12.8	172.7
18.6	209.3
<b>168</b>	

---

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
10	29/10/2018	29/10/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L
1	50	6.62	7.6
2	75	6.32	15.6
3	100	6.1	45.6
4	125	5.98	42.3
5	150	5.95	44.6
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.59</b>	<b>2.8</b>

Turbidez (UNT)	DQO total (mg/L)	Fósforo (mgP/L)
94	372.7	2.3
16	41.0	1.2
11	169.3	0.8
13.5	182.7	0.9
12.5	196.0	0.7
<b>204</b>	<b>732.7</b>	<b>7.7</b>

APÊNDICE 2 – Resultados CEPT bancada – FeCl<sub>3</sub>/RMF

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
2	19/07/2018	20/07/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L	Turbidez (UNT)
1	50	5.91	2.3	155
2	75	5.4	4.5	132
3	100	4.6	20.6	26
4	125	3.5	35.6	16
5	150	3.4	32.5	17.8
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.81</b>	<b>2</b>	<b>146</b>

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
3	26/07/2018	27/07/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L	Turbidez (UNT)
1	50	5.7	3.1	183
2	75	5.3	6.1	162
3	100	4.34	18.5	35
4	125	3.9	30.6	16.2
5	150	3.4	35.8	15.3
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.3</b>	<b>2.8</b>	<b>198</b>

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
4	02/08/2018	02/08/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L	Turbidez (UNT)
1	50	5.64	2.5	174
2	75	5.18	4.5	146
3	100	4.8	21.3	21.3
4	125	4.2	25.3	14.6
5	150	3.84	34.2	11.2
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>7.2</b>	<b>2.6</b>	<b>181</b>

DQO total (mg/L)	Fósforo Total
692.7	4.3
669.3	4.0
316.0	1.2
302.7	1.0
306.0	1.5
<b>679.3</b>	<b>4.3</b>

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
5	25/08/2018	25/08/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L	Turbidez (UNT)
1	50	5.1	2	165
2	75	4.8	2.6	156
3	100	4.5	24	15
4	125	4.2	35	11
5	150	3.8	36	12.5
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.9</b>	<b>1.8</b>	<b>158</b>

Fósforo Total
7.0
5.8
1.8
1.5
1.5
<b>7.5</b>

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
6	20/09/2018	21/09/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L	Turbidez (UNT)
1	50	5.25	3	211
2	75	4.82	4.2	185
3	100	4.55	28	21
4	125	4.01	39	14
5	150	3.77	41	9
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.4</b>	<b>3</b>	<b>201</b>

DQO total (mg/L)	Fósforo Total
719.3	6.0
696.0	5.7
296.0	1.7
274.3	1.5
271.0	1.3
<b>702.7</b>	<b>6.2</b>

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
7	27/09/2018	29/09/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L	Turbidez (UNT)
1	50	5.95	1.8	159
2	75	5.1	2	154
3	100	4.8	19.6	31
4	125	4.22	31.2	23
5	150	3.9	28.6	26
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.8</b>	<b>1.5</b>	<b>146.9</b>

DQO total (mg/L)	Fósforo Total
601.0	8.0
569.3	7.3
282.7	1.8
235.3	1.2
206.4	1.7
<b>596.0</b>	<b>8.3</b>

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
8	04/10/2018	04/10/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L	Turbidez (UNT)
1	50	5.65	3.6	199
2	75	5.23	3.9	194
3	100	4.9	26.9	35
4	125	4.23	39.3	21
5	150	3.85	35.3	23
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>7.2</b>	<b>2.4</b>	<b>198</b>

--

<b>DQO total (mg/L)</b>
699.3
689.3
272.7
266.0
272.7
<b>696.0</b>

---

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
9	18/10/2018	19/10/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L	Turbidez (UNT)
1	50	5.8	4.8	161
2	75	5.2	4.6	154
3	100	4.78	28.6	41
4	125	4.2	31.3	24
5	150	3.9	30.3	18.6
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>7.1</b>	<b>3.1</b>	<b>168</b>

<b>DQO total (mg/L)</b>
692.3
686.0
299.3
292.7
276.0

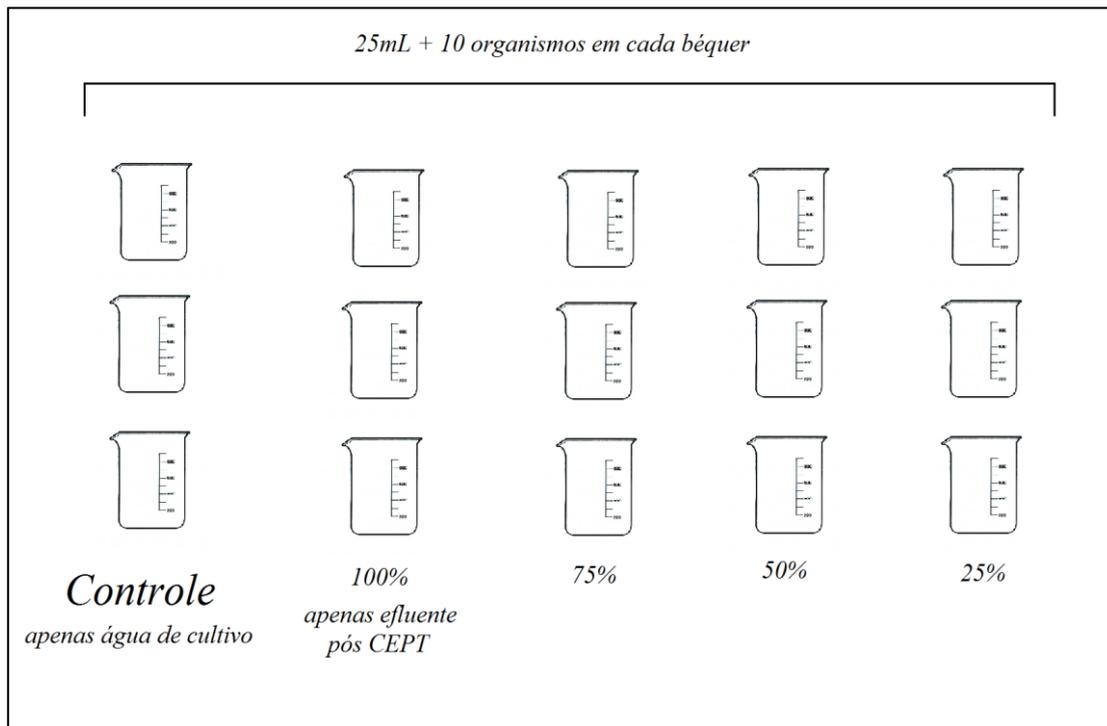
---

Ensaio	Data de Coleta do Esgoto bruto	Data ensaio jar teste
10	29/10/2018	29/10/2018

Jarro	Concentração (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentáveis mL/L	Turbidez (UNT)
1	50	5.7	4	187
2	75	5.2	4.2	178
3	100	4.8	35.2	14
4	125	4.4	32.6	16
5	150	3.9	41.2	9.5
<b>Carac. Bruto</b>	-	<b>6.59</b>	<b>2.8</b>	<b>204</b>

<b>DQO total (mg/L)</b>	<b>Fósforo Total</b>
729.3	7.3
716.0	6.3
169.3	2.3
292.7	1.2
289.3	1.0
<b>732.7</b>	<b>7.7</b>

### APÊNDICE 3 – Esquema de teste de ecotoxicidade aplicado



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2019).

APÊNDICE 4 – Interface do Cálculo de ecotoxicidade - software “JSPear test” onde:

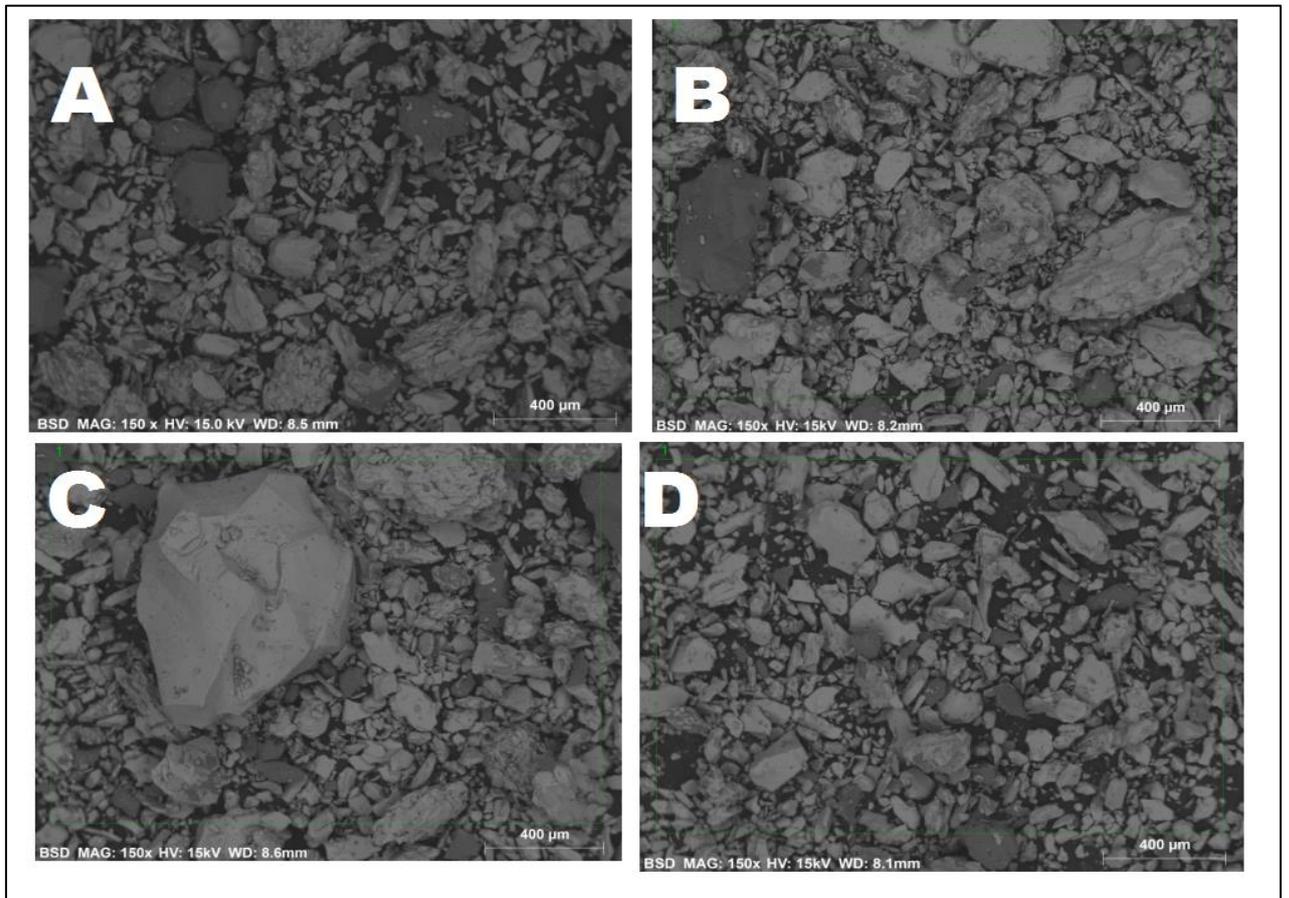
A – FeCl<sub>3</sub>Comercial e B - FeCl<sub>3</sub>/RMF

```
D:\Jsppear\GWBASIC.EXE
ENTER THE NUMBER OF CONCENTRATIONS: 4
ENTER THE 4 CONCENTRATIONS (IN INCREASING ORDER)
1: 25
2: 50
3: 75
4: 100
ARE THE NUMBER OF INDIVIDUALS AT EACH CONCENTRATION EQUAL?
(Y/N): 30
ARE THE NUMBER OF INDIVIDUALS AT EACH CONCENTRATION EQUAL?
(Y/N): y
ENTER THE NUMBER OF INDIVIDUALS AT EACH CONCENTRATION: 30
ENTER UNITS FOR DURATION OF EXPERIMENT
(HOURS, DAYS, ETC.): hours
ENTER DURATION OF TEST: 48
ENTER THE NUMBER OF MORTALITIES AT EACH CONCENTRATION
1: 2
2: 4
3: 7
4: 9
WOULD YOU LIKE A DATA GRAPH (Y/N)? n
WOULD YOU LIKE THE AUTOMATIC TRIM CALCULATION (Y/N)? y
MINIMUM REQUIRED TRIM IS TOO LARGE 70.0
SO SK IS NOT CALCULABLE.
WOULD YOU LIKE TO CONTINUE (Y/N)?
1|LIST | 2|RUN| 3|LOAD| 4|SAVE| 5|CONT| 6, "LPT1 | 7|TRON| 8|TROFF| 9|KEY | 0|SCREEN
```

```
D:\Jsppear\GWBASIC.EXE
ENTER CHEMICAL NAME: cloreto ferrico
ENTER UNITS FOR CONCENTRATION OF CHEMICAL: mg/l
ENTER THE NUMBER OF CONCENTRATIONS: 4
ENTER THE 4 CONCENTRATIONS (IN INCREASING ORDER)
1: 25
2: 50
3: 75
4: 100
ARE THE NUMBER OF INDIVIDUALS AT EACH CONCENTRATION EQUAL?
(Y/N): y
ENTER THE NUMBER OF INDIVIDUALS AT EACH CONCENTRATION: 30
ENTER UNITS FOR DURATION OF EXPERIMENT
(HOURS, DAYS, ETC.): hours
ENTER DURATION OF TEST: 42
ENTER THE NUMBER OF MORTALITIES AT EACH CONCENTRATION
1: 2
2: 4
3: 8
4: 10
WOULD YOU LIKE A DATA GRAPH (Y/N)? n
WOULD YOU LIKE THE AUTOMATIC TRIM CALCULATION (Y/N)? y
MINIMUM REQUIRED TRIM IS TOO LARGE 66.7
SO SK IS NOT CALCULABLE.
WOULD YOU LIKE TO CONTINUE (Y/N)?
1|LIST | 2|RUN| 3|LOAD| 4|SAVE| 5|CONT| 6, "LPT1 | 7|TRON| 8|TROFF| 9|KEY | 0|SCREEN
```

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

APÊNDICE 5 – Imagens de 4 amostras do RMF obtidas a partir da análise em MEV (escala 400  $\mu\text{m}$ )



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2019).