

**JOÃO VICTOR DE ALMEIDA PRADO**

**AVALIAÇÃO DO PLANEJAMENTO FATORIAL APLICADO NO  
PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO NO TRATAMENTO DE  
CHORUME**

Sorocaba  
2024

**JOÃO VICTOR DE ALMEIDA PRADO**

**AVALIAÇÃO DO PLANEJAMENTO FATORIAL APLICADO NO  
PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO NO TRATAMENTO DE  
CHORUME**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" na Área de Concentração Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Leandro Cardoso de Morais

Sorocaba

2024

P896a	<p>Prado, João Victor de Almeida</p> <p>Avaliação do planejamento fatorial aplicado no processo oxidativo avançado no tratamento de chorume / João Victor de Almeida Prado. -- Sorocaba, 2024</p> <p>63 p.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba</p> <p>Orientador: Leandro Cardoso de Moraes</p> <p>1. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 2. Recuperação e remediação ambiental. 3. Química ambiental. I. Título.</p>
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.


**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AVALIAÇÃO DO PLANEJAMENTO FATORIAL APLICADO NO PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO NO TRATAMENTO DE CHORUME


**AUTOR: JOÃO VICTOR DE ALMEIDA PRADO**

**ORIENTADOR: LEANDRO CARDOSO DE MORAIS**


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 **LEANDRO CARDOSO DE MORAIS**  
Data: 16/04/2024 14:23:16-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. LEANDRO CARDOSO DE MORAIS (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Ambiental / Unesp Instituto de Ciencia e Tecnologia Campus de Sorocaba

Documento assinado digitalmente  
 **MANUEL ENRIQUE GAMERO GUANDIQUE**  
Data: 16/04/2024 11:34:40-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. MANUEL ENRIQUE GAMERO GUANDIQUE (Participação Virtual)  
Engenharia Ambiental / Unesp Instituto de Ciencia e Tecnologia de Sorocaba

Documento assinado digitalmente  
 **DANIELE FRASCARELI**  
Data: 16/04/2024 09:59:02-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. DANIELE FRASCARELI (Participação Virtual)  
Faculdade Anhanguera - Jaú

Sorocaba, 16 de abril de 2024.

## RESUMO

A geração de resíduos urbanos tem aumentado ao longo do tempo, e à medida que a população cresce, torna-se evidente uma tendência crescente na produção de resíduos. Os aterros sanitários, foram desenvolvidos como alternativa para armazenar todo resíduo produzido, esses lugares devem ser construídos de forma que possua um isolamento perfeito, evitando que o resíduo entre em contato direto com rios, lençol freático e solos. Toda matéria armazenada nos aterros entra em decomposição, produzindo um líquido com coloração acentuada, e caracterizada por alto valor poluente, denominado de chorume. Este poluente apresenta em sua composição, traços de compostos orgânicos e metais potencialmente tóxicos. Os metais potencialmente tóxicos quando exposto aos corpos de água ou solos são absorvidos, gerando riscos potenciais à saúde. Como alternativa para combater o agravante desses poluentes presentes em resíduos, é aplicado diversas tratativas para remoção dos compostos poluentes, neste trabalho foi desenvolvido um estudo estatístico envolvendo o processo de Foto-Fenton avaliando a remoção de carbono total. Para que tal processo foi possível, houve a criação de duas etapas. A primeira etapa, uma filtração para remoção dos sólidos em suspensão, a segunda etapa, foi a aplicação do processo oxidativo avançado composto por  $H_2O_2$  e UV. Através da primeira etapa, houve uma remoção de 53% a partir da coloração inicial do chorume. Seguindo com a segunda etapa, o processo oxidativo avançado, comprovou possuir uma boa eficiência, com um tempo total de 90 minutos de operação, pode remover 99,18% da coloração, 98,63% da turbidez e 81,7% da demanda química de oxigênio. A aplicação do estudo estatístico, foi de extrema importância, pois a partir dele, foi possível detectar que o pH foi a variável com maior impacto na remoção de carbono total, quando comparada com o tempo e a diluição da amostra. Concluindo então, que o método Foto-Fenton escolhido, foi capaz de reduzir os valores de turbidez, cor e demanda química de oxigênio do chorume, além da utilização do estudo estatístico ser fundamental para dar fundamento e melhor analisar os resultados obtidos, detectando regiões ótimas de trabalho e distinção de variáveis.

Palavras-chave: adsorção de metais possivelmente tóxicos; processo de oxidação avançada; tratamento de chorume.

## ABSTRACT

The generation of urban waste has increased over time, and as the population grows, an increasing trend in waste production becomes evident. Sanitary landfills were developed as an alternative to store all waste produced. These places must be built in such a way that they have perfect insulation, preventing the waste from coming into direct contact with rivers, groundwater and soil. All matter stored in landfills decomposes, producing a liquid with a pronounced color and characterized by a high pollutant value, called leachate. This pollutant contains traces of organic compounds and potentially toxic metals in its composition. Potentially toxic metals when exposed to bodies of water or soil are absorbed, generating potential health risks. As an alternative to combat the aggravation of these pollutants present in waste, several treatments are applied to remove the polluting compounds. In this work, a statistical study was developed involving the Photo-Fenton process evaluating the total carbon removal. To make this process possible, two stages were created. The first stage, filtration to remove suspended solids, the second stage, was the application of the advanced oxidative process composed of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV. Through the first stage, there was a removal of 53% from the initial color of the leachate. Continuing with the second stage, the advanced oxidative process has proven to have good efficiency, with a total operating time of 90 minutes, it can remove 99.18% of the color, 98.63% of the turbidity and 81.7% of the chemical demand. of oxygen. The application of the statistical study was extremely important, as from it, it was possible to detect that pH was the variable with the greatest impact on total carbon removal, when compared to time and sample dilution. Concluding then, that the chosen Photo-Fenton method was able to reduce the values of turbidity, color and chemical oxygen demand of the leachate, in addition to the use of statistical study being fundamental to provide basis and better analyze the results obtained, detecting optimal regions work and distinction of variables.

Keywords: adsorption of possibly toxic metals; advanced oxidation process; slurry treatment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação de uma coluna de adsorção.....	20
Figura 2 - Faixa de comprimento de onda.....	26
Figura 3 - Fluxograma experimental .....	32
Figura 4 - Localização do estado de São Paulo .....	33
Figura 5 - Localização da cidade de Votorantim.....	33
Figura 6 - Aterro Sanitário do Município de Votorantim.....	34
Figura 7 - Conjunto para realização da primeira etapa.....	40
Figura 8 - Sistema do processo Oxidativo Avançado.....	41
Figura 9 - Cinética de reação.....	42
Figura 10 - Coloração em função do tempo .....	44
Figura 11 - Eficiência de remoção da coloração .....	44
Figura 12 - Turbidez em função do tempo .....	45
Figura 13 - Turbidez em função do tempo .....	46
Figura 14 - Demanda Química de Oxigênio em função do tempo.....	47
Figura 15 - Gráfico de Pareto .....	50
Figura 16 - Gráfico de Efeitos Principais .....	51
Figura 17 - Gráfico de contorno pH vs Tempo .....	52
Figura 18 - Gráfico de contorno Diluição vs pH.....	53
Figura 19 - Gráfico de contorno Tempo vs Diluição.....	53
Figura 20 - Gráfico de otimização.....	54

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Poder oxidativo de diferentes componentes .....	24
Tabela 2 - Vantagens na utilização dos processos oxidativos avançado .....	25
Tabela 3 - Planejamento fatorial.....	37
Tabela 4 - Resultado das caracterizações .....	38
Tabela 5 - Resultados da Cinética de reação .....	43
Tabela 6 - Remoção de cor e turbidez .....	43
Tabela 7 - Resultado carbono total .....	49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>GERAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO</b> .....	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>CHORUME</b> .....	<b>15</b>
<b>3.3</b>	<b>MÉTODOS DE TRATAMENTO</b> .....	<b>16</b>
3.3.1	<i>Precipitação química</i> .....	16
3.3.2	<i>Coagulação/Floculação</i> .....	17
3.3.3	<i>Adsorção por carvão ativado</i> .....	18
3.3.4	<i>Sistema de lagoa</i> .....	21
3.3.4.1	<i>Lagoa anaeróbia</i> .....	21
3.3.4.2	<i>Lagoa facultativa</i> .....	22
3.3.5	<i>Evaporação</i> .....	22
3.3.5.1	<i>Evaporação natural</i> .....	23
3.3.5.2	<i>Evaporação forçada</i> .....	23
3.3.6	<i>Processo de oxidação avançado</i> .....	23
3.3.7	<i>Vantagens do uso de processos oxidativos avançados</i> .....	25
3.3.7.1	<i>Ozônio com peróxido de hidrogênio</i> .....	26
3.3.7.2	<i>Ozônio com radiação ultravioleta</i> .....	26
3.3.7.3	<i>Peróxido de hidrogênio com ozônio e ultravioleta</i> .....	27
3.3.7.4	<i>Reação de Fenton</i> .....	28
3.3.7.5	<i>Reação de Foto-Fenton</i> .....	30
3.3.7.6	<i>Reação UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></i> .....	30
3.3.8	<i>Planejamento fatorial</i> .....	31
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>LOCAL DA COLETA</b> .....	<b>32</b>
<b>4.2</b>	<b>COLETA DO MATERIAL</b> .....	<b>35</b>
<b>4.3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE</b> .....	<b>35</b>
<b>4.4</b>	<b>PH DO EFLUENTE</b> .....	<b>35</b>
<b>4.5</b>	<b>COR</b> .....	<b>35</b>
<b>4.6</b>	<b>PROCESSO DE OXIDAÇÃO AVANÇADA</b> .....	<b>36</b>
<b>4.7</b>	<b>PLANEJAMENTO FATORIAL</b> .....	<b>36</b>
4.7.1	<i>Minitab</i> .....	36
4.7.2	<i>Estudo fatorial</i> .....	37
<b>4.8</b>	<b>FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>38</b>

<b>5.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO LIXIVIADO.....</b>	<b>38</b>
<b>5.2</b>	<b>ETAPA PRIMARIA - FILTRAÇÃO .....</b>	<b>40</b>
<b>5.3</b>	<b>ETAPA SECUNDÁRIA – PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO.....</b>	<b>41</b>
<b>5.4</b>	<b>ENSAIO UTILIZANDO UM SISTEMA UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.....</b>	<b>41</b>
<b>5.5</b>	<b>CINÉTICA DO PROCESSO DE OXIDAÇÃO AVANÇADA.....</b>	<b>42</b>
<b>5.6</b>	<b>COR.....</b>	<b>43</b>
<b>5.7</b>	<b>TURBIDEZ .....</b>	<b>45</b>
<b>5.8</b>	<b>DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO .....</b>	<b>46</b>
<b>5.9</b>	<b>CARBONO TOTAL .....</b>	<b>48</b>
<b>5.10</b>	<b>RESULTADO DO PLANEJAMENTO FATORIAL .....</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>6.1</b>	<b>ETAPAS FUTURAS.....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a grande quantidade de produção de resíduos sólidos urbano se torna preocupante, sendo tema de pesquisas e estudos, é buscada uma alternativa para melhorar as condições atuais de descartes e minimizar os impactos causado quando mau alocado ou descartado de maneira incorreta. Um fator que agrava à atual situação é o avanço populacional, aumentando a demanda de recursos, recorrendo a uma exploração do meio ambiente, afetando diretamente na qualidade de vida. (Wissmann; Konraht; Schafer; Cunha, 2014)

A produção de resíduos sólidos urbanos, constituídos em sua maioria por rejeitos alimentos, produtos deteriorados, materiais compostos por papeis como jornais e revistas, garrafas, embalagens de diversos tipos, papel higiênico, fraudas descartáveis, além de resíduos alta variedade de toxicidade, partindo de tintas e solventes, para lâmpadas e baterias. Se intensifica conforme o número populacional aumenta, previsões baseadas em estudos divulgados pela Organização das Nações Unidas (ONU), estimativas apontam uma população mundial de 10,9 bilhões de pessoas para 2050. (Moreira; Braga; Hansen, 2011)

Como forma para acomodar toda a quantidade de resíduos sólidos urbanos produzida é o aterro sanitário, que tem por objetivo servir de armazenagem de resíduos, gerando o mínimo de impactos possíveis ao meio ambiente e a saúde populacional. Porém para construção de um aterro, é necessária uma área grande, com uma localização estratégica, permitindo uma acomodação e total isolamento do contato com o solo, lençóis freáticos e rios, para que a contaminação pelo chorume seja mínima. (Moreira; Braga; Hansen, 2011)

Categorizado como um resíduo líquido com altos índices de cargas orgânicas e com uma coloração muito turva. O chorume é obtido através da decomposição química e microbiológica de todos os resíduos sólidos presentes no aterro. Sua composição pode variar de acordo com sua natureza dos resíduos decompostos, forma de acomodação desses materiais, tempo de construção do aterro, além de altas sensibilidade a fatores climáticos, principalmente pela presença de chuva e variações de temperaturas. É possível destacar duas classes de materiais extremamente presentes na composição do chorume, como os componentes inorgânicos, englobando o Ca, Mg, Na, K,  $\text{NH}_4^+$ , Fe, Mn, Cl,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$ . E a presença de metais potencialmente tóxicos, considerados tóxicos, como exemplo o Cd, Cr, Cu, Pb, Ni e Zn. (Morais; Sirtori; Peralta-Zamora, 2006)

Diante dessa situação apresentada é notável a preocupação que paira ao redor dos cuidados quanto a poluição que o chorume pode causar caso tenha contato com águas e

superfícies, causando um impacto severo, provocando alterações no ecossistema aquático, flora e fauna de uma região. Uma das alternativas desenvolvidas para evitar esses problemas e condições, é aplicação de tratamentos adequados no aterro, possibilitando a reutilização deste material, contribuindo para a sustentabilidade da sociedade. (Lessa, 2017)

Uma solução aplicada como alternativa que vem surgindo são os processos oxidativos avançados, normalmente integrados a outros processos convencionais, gerando resultados positivos, esse fator se dá, pois, essa matéria orgânica pode ser decomposta através de um processo oxidativo, a partir de um radical hidroxila. Os processos oxidativos avançados, podem ser aplicados em efluentes industriais, petroquímicos, farmacêuticos, e outros considerados complexos de serem tratados. (Reis, 2018)

Este presente trabalho tem por objetivo avaliar o tratamento do chorume obtido em aterro sanitário, dividindo em duas etapas, tratamento primário, remoção de qualquer material particulado que possa interferir nas etapas seguintes, tratamento secundário, aplicação do processo de oxidação avançada para maior remoção possível da carga orgânica, nesta segunda etapa, foi aplicado um planejamento fatorial do tipo  $2^3$ , no intuito de otimizar e compreender algumas variáveis presente no processo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar as condições aplicadas na etapa de oxidação avançada utilizando a radiação UV junto com  $H_2O_2$ , com intuito de melhorar e entender as condições do processo. Para que tal estudo ocorra, será utilizado um planejamento fatorial  $2^3$ , a partir do software *Minitab*. Estudando a interação entre pH, tempo e concentração do chorume.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliação da remoção do material em suspensão presente no chorume;
- Avaliação da aplicação do processo de oxidação avançado, como etapa secundária, do tratamento;
- Analisar a capacidade do processo oxidativo avançado frente a um efluente com alta carga orgânica;
- Desenvolver um estudo estatístico sobre o sistema elaborado;
- Avaliar o desempenho de cada etapa do tratamento;

### **3 REVISÃO DA LITERATURA**

#### **3.1 Geração de resíduo sólido**

A cultura de um povo é fortemente caracterizada pela maneira com o qual o meio ambiente é usufruído, através de costumes e hábitos de consumo de produtos industrializados. Na sociedade majoritariamente urbanizada, os costumes e hábitos se interligam diretamente na produção de rejeito sólido e o seu destino, gerando impactos a áreas não tomadas pelo avanço urbano. A produção de rejeito sólido é atrelada com o consumismo cotidiano da população, por sua vez, quanto maior o consumo de produtos industrializados, maior será seu rejeito sólido produzido (Mucelin, 2022).

Dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, mostram que a geração de resíduos produzidos no Brasil é equivalente a 81,8 milhões de toneladas no ano de 2022. Segundo a Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) aponta que cada brasileiro produz, em média, 379,2 kg de rejeito sólido por ano, o que corresponde a mais de 1 kg por dia. Fatos esses que fomentam discussões voltadas aos impactos ambientais envolvendo o descarte inadequado dessa produção massiva de resíduo urbano e seus subprodutos gerados.

O homem é o centro da produção significativa de resíduos sólidos. Os resíduos podem variar de acordo com sua origem, possuindo diversas naturezas e misturas que o tornam complexos, mas em sua maioria são majoritariamente constituídos de matéria orgânica, papel, vidro, plástico e metais. Outro fator que torna a geração dos resíduos mais complexa, é sua origem, podendo ser variar entre resíduos domésticos, comerciais e industrial (Lessa, 2017).

Como alternativa mais segura para contém os resíduos, consiste em descartá-los em aterros sanitários, a esses, devem possuir em sua estrutura uma boa impermeabilização e com drenos de coleta de lixiviados produzidos, devem ser operados com eficiência, com cobertura de solo ao final de cada período de serviço e localização ambientalmente adequada.

Existem alternativas consideradas ambientalmente adequadas para destinação ou disposição de resíduos sólidos urbanos como a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e quando possível o aproveitamento energético (Oliveira; Pascal, 2004).

O rejeito sólido presente no aterro sanitário passa por alguns processos físicos, químicos e biológicos de decomposição, produzindo frações residuais gasosas e líquidas (Lo, 1996).

Este líquido é produzido a partir da decomposição do rejeito sólido, porém seu fluxo de geração é atrelado com os fatores ambientais ligados incidência com água, como por exemplo a exposição a chuvas, temperatura do aterro e da composição dos resíduos. A ação de bactérias é um acelerador da decomposição do rejeito sólido. No início da decomposição há presença marcante de bactérias acetogênicas, caracterizando um pH inicial ácido do chorume, após determinado período de decomposição, o chorume apresenta um pH básico, devido a diminuição da concentração de bactérias acetogênicas e o aumento das bactérias metanogênicas (Pacheco, 2004).

### 3.2 Chorume

A origem do termo “chorume” vem desde outras épocas, porém seu significado sofreu com mudanças ao longo do tempo. No princípio, sua utilização era exclusivamente para designar substâncias de aspecto gorduroso, proveniente pelo tecido adiposo da banha de um animal. Outra definição pode é apontada por Schimidit *et al.* (2003), que atribuem a origem do líquido como aquele proveniente das lavagens de estábulos, esta definição nos tempos atuais é muito comum entre os agropecuaristas como fonte de adubo orgânico.

O chorume é um líquido de cor negra, odor forte, com altas concentrações de componentes orgânicos e inorgânicos, resultado da percolação da água através dos resíduos domésticos, dispostos em aterros sanitários, em processo de decomposição. Sua composição físico-química é extremamente variável e complexa de se definir, pois sua origem depende de fatores que vão desde as condições pluviométricas locais, tempo de disposição e das características do próprio rejeito sólido(Lessa, 2017).

Rocha (2005) assevera que o chorume tem origem na transformação de determinados resíduos em um líquido composto de elementos químicos em solução proveniente da digestão anaeróbia da matéria orgânica por enzimas produzidas por bactérias. Tais transformações passam por uma fase de ajustamento inicial do aterro em que os resíduos são dispostos e começam a acumular umidade, após a camada de cobertura o processo de estabilização tem início e algumas mudanças no ambiente interno podem ser notadas.

### 3.3 Métodos de tratamento

Devido a sua complexidade, a maneira de adequação do chorume varia de acordo com suas características, essas influências diretas afetam significativamente sua composição química e conseqüentemente seu posterior tratamento. Devido a isso, a escolha entre as diversas alternativas de tratamento depende de parâmetros técnicos e econômicos aplicados no meio, dentre os inúmeros tratamentos aplicados, se ressaltam os mais aplicados, como precipitação química, coagulação ou floculação, adsorção por carvão ativado, sistema de lagoas, evaporação e um método que vem se mostrando promissor os processos oxidativos avançados (Souza *et al.*, 2015).

#### 3.3.1 Precipitação química

A precipitação química é um mecanismo utilizado para promover a remoção de compostos orgânicos não biodegradáveis, nitrogênio amoniacal e metais pesados presentes no meio. Esse processo envolve a adição de produtos químicos que atuam na remoção de substâncias dissolvidas e suspensas por sedimentação. No método de precipitação química, é comumente utilizado precipitantes químicos como fosfato de amônia e magnésio ou hidróxido de cálcio, comumente chamada de cal hidratada. A escolha desses precipitantes depende do objetivo da remoção. Em diversas aplicações industriais e científicas, a precipitação é realizada adicionando coagulantes, como cal, sais de ferro ou polímeros orgânicos, para formar um sólido. Esse sólido é chamado de precipitado e é uma substância insolúvel que pode se formar quando a solução está supersaturada com um composto (Rocha, 2013).

Conforme o sólido se forma, vai aumentando a sua densidade do precipitado formado, podendo se depositar no fundo da solução ou permanecer flutuando. Para efetuar a remoção dos precipitados é necessário aplicar outros mecanismos, realizando a promoção da limpeza do meio. No entanto, um problema comum associado a esse método é a formação do lodo. Quando o método de precipitação química é aplicado a um meio líquido muito tóxico, o lodo proveniente poderá conter materiais tóxicos. A presença do lodo pode ser um desafio, pois é um resíduo que precisa ser tratado e gerenciado adequadamente, evitando a contaminação do meio ambiente. Outro fator é a quantidade de lodo produzido, causando problemas na gestão de geração, além de altos custos envolvendo descartes e armazenamentos, podendo inviabilizar o processo (Rocha, 2013).

Embora a precipitação química seja uma técnica amplamente utilizada para remoção de poluentes em diversas aplicações, é importante considerar os desafios associados à formação de lodo e a necessidade de tratamento adequado desse resíduo. Silva *et al.* (2000) realizaram precipitação química utilizando solução de cloreto férrico 40% (m/v) e obtiveram redução de 68% na DQO mas, o pH do efluente final abaixou de 7,1 para 4,6.

### 3.3.2 Coagulação/Floculação

O processo de coagulação/floculação é utilizado para remover substâncias coloidais que atuam diretamente na coloração e turbidez no meio. Esse processo unitário é considerado como um pré-tratamento que visa adequar o efluente para o tratamento subsequente, ocasionando reduções de custos e esforços (Vaz, 2009).

A presença de altas colorações nas águas impactam em diversas implicações ambientais, como a relação dos impactos fotossintéticos nos corpos d'água. A cor pode ser resultado da decomposição da matéria orgânica, da presença de íons metálicos naturais, como ferro e manganês, ou do lançamento de diversos tipos de despejos industriais. Embora este fator não possuísse relevância aos problemas sanitários, somente no final do ano de 1970 que foi comprovado que os materiais dissolvidos responsáveis pela cor são precursores de substâncias potencialmente carcinogênicas. Desde então, maior atenção tem sido dada à remoção da cor (Vaz, 2009).

A turbidez da água é determinada para evidenciar alterações. A presença de turbidez indica a presença de partículas em suspensão que possuem a capacidade de refletir a luz, impedindo que ela chegue aos organismos aquáticos. De acordo com Santos (2007), alguns vírus e bactérias podem se alojar nas partículas em suspensão, protegendo-se da ação de desinfetantes. Portanto, a turbidez também é considerada um aspecto importante do ponto de vista sanitário.

Os termos coagulação e floculação são frequentemente usados como sinônimos, pois ambos se referem ao processo de aglomeração de partículas. A coagulação é o processo no qual um coagulante adicionado à água reduz as forças que mantêm as superfícies das partículas separadas, enquanto a floculação é a aglomeração dessas partículas por meio do transporte de fluido, formando partículas maiores que podem sedimentar (Cardoso, 2007).

Por meio da adição de eletrólitos, a coagulação neutraliza as forças de repulsão entre as partículas coloidais por meio de mecanismos de ligação e adsorção das partículas (Vaz, 2009). Para que o processo de coagulação ocorra de maneira eficiente, é necessário manter

agitação intensa para permitir o contato efetivo e constante entre o coagulante e o efluente promovendo uma maior interação molecular. (Di Bernardo; Dantas, 2005)

A floculação das partículas que foram coaguladas pelo eletrólito ocorre devido às várias forças de atração que atuam entre as partículas "neutralizadas", fazendo com que elas se agreguem umas às outras e formem os chamados flocos. A velocidade de formação desses flocos depende, inicialmente, do movimento térmico e, quando atingem cerca de 0,1 mm de tamanho, também sofre influência da agitação mecânica do meio. Nesta etapa é importante que a agitação mecânica seja moderada para evitar a desagregação dos flocos já formados, o que dificultaria sua remoção. O processo de coagulação/floculação, seguido pela sedimentação, é efetivo na remoção de cor e turbidez do efluente a ser tratado. (Vaz, 2009)

### 3.3.3 *Adsorção por carvão ativado*

Sua aplicação em pesquisas e utilização industrial não é recente. Esse tipo de material foi descoberto na segunda metade do século XVIII, a partir da observação de sua interação com gases. Segundo Rodrigues (2002), o uso pioneiro da adsorção como um processo de purificação despertou o interesse pelo assunto no início do século XIX, outro caso foi durante a Primeira Guerra Mundial, onde esse material foi utilizado na confecção de máscaras de gás usufruindo dessa operação unitária para adsorver os gases tóxicos (Franchi, 2004).

Durante esse processo o material com capacidade de adsorver, recebe o nome de adsorvente, já o meio que será adsorvido recebe o nome de adsorvato. Segundo Heumann (1997), é uma operação unitária que envolve da transferência de massa de uma ou mais substâncias contidas em uma corrente gasosa ou líquida, que são transferidas por meio de seletividade iônica para a superfície de um sólido poroso.

A adsorção pode ocorrer através de dois tipos, adsorção química, conhecida como quimissorção, que envolve reações químicas, e adsorção física, conhecida como fisissorção, que envolve apenas forças físicas.

A fisissorção baseia-se na interação que ocorre entre as moléculas de um determinado composto e um material sólido, cujo processo retém as moléculas na superfície do sólido adsorvente devido à existência de forças físicas, nesse caso as interações de Van der Waals, sem a ocorrência de reação química. Nesse tipo de adsorção, a superfície do adsorvente é coberta com uma camada de moléculas do adsorvato, e outras camadas podem ser depositadas sobre essa camada. Esse fenômeno é rápido e permite a recuperação do adsorvato através do processo inverso, denominado de dessorção, que ocorre por diminuição

da pressão ou aumento da temperatura do sistema. Isso possibilita a recuperação do adsorvato e a regeneração do adsorvente para posterior reutilização, muito aplicado para prolongar a utilização do material, porém pode comprometer a eficiência do adsorvente. Na adsorção física, as forças de atração envolvidas são mais fracas do que as ligações químicas, devido a isso, processos de fisissorção tendem a serem mais fracos, não gerando um resultado significativo, processo esse evitado (Rousseau, 1987).

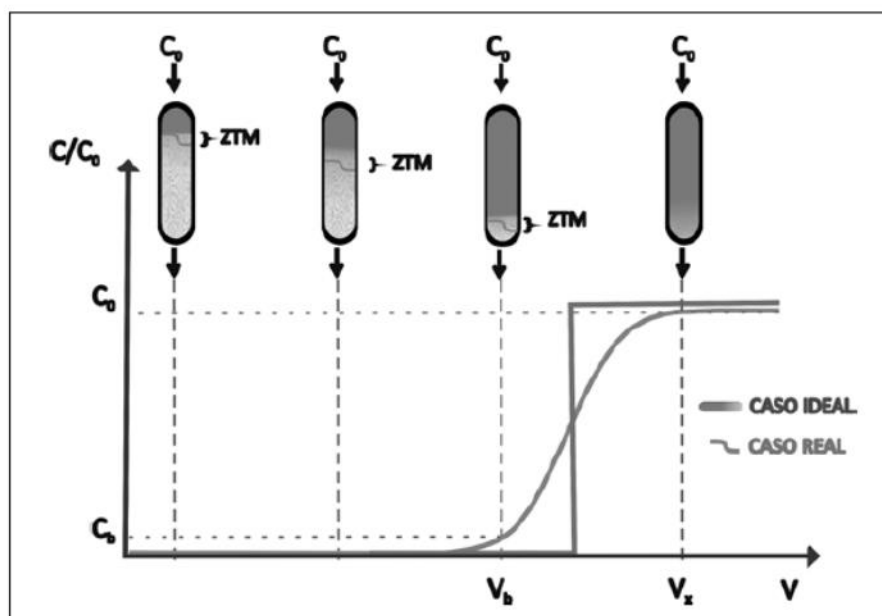
A quimissorção envolve a transferência ou compartilhamento de elétrons entre o adsorvato e o adsorvente, como ocorre em compostos químicos. Durante a quimissorção, um novo composto é formado na superfície do sólido devido à reação química entre o adsorvato e o adsorvente. A ligação da substância adsorvida na superfície do adsorvente é geralmente muito forte, tornando o processo praticamente irreversível. Portanto, o adsorvato não pode gerar uma condição contrária, retornando à condição inicial, este processo chamado de dessorção, seja pelo aumento da temperatura ou pela diminuição da pressão do sistema. No decorrer da etapa de quimissorção, as moléculas das substâncias removidas são retidas na superfície do sólido, deste modo, somente a camada superficial interage com o meio, enquanto as camadas internas do adsorvente permanecem excluídas ao sistema (Rodrigues, 2002).

A adsorção permite diversas maneiras em termos de sua operação, sendo as mais comuns o reator de mistura líquida e a coluna com leito fixo para líquidos, gases e vapores. Segundo Noll *et al.* (1992), a configuração mais simples de uma unidade adsorvedora é o reator de mistura. Nesse tipo de configuração, o adsorvente, comumente um material sólido particulado com enorme superfície de contato, é misturado com a corrente líquida contendo o adsorvato até que o equilíbrio seja alcançado. Após o equilíbrio, as fases são separadas para tratamento posterior ou disposição final. No entanto, esse tipo de configuração não é muito eficiente, e para melhorar a eficiência, é necessário o uso de mais de uma unidade em série (Alves, 2007).

Rodrigues (2002) cita que o adsorvedor com configuração do tipo coluna com leito fixo e operação contínua é o mais usado, tanto para líquidos quanto para gases e vapores. Conforme a representação na Figura 1, para este tipo de configuração, a unidade consiste em uma coluna com leito fixo adsorvente, por onde a corrente do fluido a ser tratado passa continuamente. O fluido é alimentado até que a concentração do adsorvato na saída da coluna atinja um valor pré-determinado ou o próprio valor da alimentação, definindo assim a saturação do leito. Geralmente, esse sistema opera com duas colunas, permitindo que uma esteja em operação de adsorção enquanto a outra está em dessorção ou manutenção. O

processo de adsorção é muito complexo e depende da natureza química e física do adsorvato e do adsorvente em questão, sendo difícil generalizar o projeto de uma unidade adsorvedora (Alves, 2007).

Figura 1- Representação de uma coluna de adsorção



Fonte: Meneghini (2017).

Os projetos envolvendo esta operação unitária são baseados em experiências com outros casos similares, como experimentos aplicados em laboratórios simulando diversas condições e situações (Rodrigues, 2002).

É de extrema importância conhecer a natureza química e física do sistema, pois acarretará diretamente na eficiência do processo utilizado. Conhecimento sobre os parâmetros cinéticos e de equilíbrio do processo, além da taxa de adsorção suportada pelo adsorvente são essenciais para adaptações do processo em escalas maiores, e essas informações são geralmente determinadas por experimentos em escala de bancada (Noll; Gounaris; Hou, 1992).

Portanto, o projeto de uma unidade adsorvedora requer o conhecimento de diversas informações críticas para o sistema, como as características do adsorvente, os parâmetros cinéticos da adsorção, as relações de equilíbrio entre o adsorvato e o adsorvente, a dinâmica do processo, as condições de operação e os conceitos para a ampliação de escala do

adsorvedor, desde uma unidade de bancada até uma unidade em escala industrial (Alves, 2007).

### 3.3.4 *Sistema de lagoa*

Este sistema baseado em lagoas de estabilização é um dos tipos de tratamento mais utilizado no Brasil, devido à alta disponibilidade de área, clima favorável, baixo custo de implantação e operação, simplicidade na construção, operação e manutenção, entre outras vantagens. (Fabreti, 2006)

No entanto, o efluente resultante do processo das lagoas facultativas apresenta dificuldades em atender aos restritivos padrões de lançamento recomendados pela Resolução Nº 357 do CONAMA. As principais desvantagens incluem a necessidade de áreas relativamente grandes, a presença de concentrações elevadas de algas no efluente final, baixa eficiência na remoção de nutrientes e a emissão de odores desagradáveis das lagoas anaeróbias. (Fabreti, 2006)

#### 3.3.4.1 Lagoa anaeróbia

As lagoas anaeróbias são escavações mais profundas, com altura útil variando entre 3,0 à 5,0 metros, onde os efluentes são retidos por um período de 4 a 6 dias. Nessas condições, é garantida a anaerobiose, uma vez que a penetração de luz e a sobrevivência de algas são possíveis apenas em uma camada superficial muito limitada. Por outro lado, a taxa de aplicação de matéria orgânica é elevada, o que leva ao rápido esgotamento do oxigênio presente nos esgotos de entrada. Nas condições de temperatura no Brasil, obtêm-se eficiências de remoção de DBO5 dos esgotos na faixa de 40% a 60%. (Von Sperling, 2002)

Nessas condições, a matéria orgânica é inicialmente convertida por bactérias facultativas em ácidos voláteis, como o ácido acético, e, posteriormente, é definitivamente oxidada por bactérias anaeróbias estritas em metano e dióxido de carbono. O nitrogênio orgânico é convertido em nitrogênio amoniacal e o nitrato pode ser reduzido a nitrogênio molecular, na forma de gás nitrogênio. Os fosfatos orgânicos são oxidados em ortofosfatos. A geração de maus odores ocorre devido à redução de sulfato a sulfeto, o que promove a liberação de gás sulfídrico. (Von Sperling, 2002)

### 3.3.4.2 Lagoa facultativa

As lagoas facultativas são escavações mais rasas, com profundidades típicas na faixa de 1,5 a 2,0 metros, e possuem áreas de espelho d'água relativamente maiores em comparação com as lagoas anaeróbias. Os sólidos sedimentáveis presentes nos esgotos depositam-se no fundo das lagoas facultativas, onde passam por decomposição anaeróbia. A matéria orgânica solúvel permanece na massa líquida e sofre decomposição aeróbia devido à ação de microrganismos heterotróficos. Esses microrganismos aproveitam o oxigênio liberado pela fotossíntese de algas, assim como a ventilação superficial. O dióxido de carbono resultante da decomposição da matéria orgânica é utilizado como matéria-prima no processo fotossintético, completando o ciclo de simbiose característico desse processo. Em condições normais de operação, essas lagoas são capazes de atingir eficiências de remoção de DBO5 superiores a 80%. (Von Sperling, 2002)

A profundidade das lagoas facultativas permite a penetração de luz e a produção de oxigênio por meio da fotossíntese em quase toda a sua extensão, sendo utilizados pelos microrganismos heterotróficos na decomposição da matéria orgânica. Parte dos sólidos presentes nos esgotos se deposita no fundo da lagoa e passa por decomposição anaeróbia, o que confere o caráter facultativo à lagoa. A ação dos ventos sobre a superfície das lagoas também é importante para a oxigenação, por isso é desejável manter uma área livre ao redor das lagoas. (Fabreti, 2006)

### 3.3.5 *Evaporação*

A evaporação é uma operação unitária muito eficiente para reduzir significativamente o volume de um efluente. Esse processo pode ser realizado através da energia solar, denominado como evaporação natural, ou pela queima de algum gás, denominado de evaporação forçada. A evaporação natural é mais adequada em regiões com altos níveis de exposição solar, como áreas tropicais e subtropicais. Já a evaporação forçada, além de reduzir o volume do chorume, ainda possibilita a geração de créditos de carbono. Esses benefícios têm incentivado a utilização de evaporadores convencionais em alguns aterros no Brasil, como em São Paulo, Bahia e Rio de Janeiro. (Gomes, 2009)

No entanto, a aplicação de evaporadores convencionais tem enfrentado obstáculos em países desenvolvidos devido aos diversos efluentes gasosos que são gerados durante o processo. A tecnologia de evaporação precisa ser avaliada para sua implantação, devendo considerar aspectos como os custos reais de implantação e operação, parâmetros de controle

operacional dos equipamentos e as características dos resíduos sólidos e gasosos gerados, principalmente no processo de evaporação forçada. (Tavares, 2011)

#### 3.3.5.1 Evaporação natural

O tratamento do chorume por evaporação natural é baseado no aproveitamento direto da energia solar, em um sistema simples que reproduz em pequena escala o processo natural de purificação da água por meio da evaporação. Nesse processo, a radiação solar aquece o chorume, fazendo com que a água presente em sua composição evapore e deixe os resíduos sólidos. Alguns modelos de evaporadores permitem a liberação dos gases gerados no processo para a atmosfera, enquanto outros coletam os gases gerados e passam por um processo de condensação, evitando contaminações ambientais, uma vez que esse processo pode produzir gases nocivos em conjunto com o vapor d'água. Os diferentes modelos de evaporadores variam nos materiais utilizados, na geometria, nos métodos de suporte da cobertura transparente e nos arranjos para entrada e saída de líquidos. Já os fatores que influenciam a eficiência desse processo de evaporação, é possível citar a inclinação da superfície de vidro, pois quanto maior for a inclinação, maior será a quantidade de radiação solar absorvida pelo evaporador. (Gomes, 2009)

#### 3.3.5.2 Evaporação forçada

A evaporação forçada segue o mesmo princípio da evaporação natural, mas difere no tipo de energia utilizado para aquecer o efluente, em casos da evaporação aplicada no chorume, é comum o uso do biogás produzido no próprio aterro sanitário como gás gerador.

Por meio desse processo, é possível reduzir o volume do chorume em até 97%, utilizando o biogás como fonte de calor. Esse processo gera resíduos sólidos ou semi-sólidos, que podem ser reintegrados ao aterro sanitário, e resíduos gasosos, que podem ser liberados na atmosfera ou tratados de acordo com as regulamentações vigentes. (Gomes, 2009)

#### 3.3.6 *Processo de oxidação avançado*

Os Processos Oxidativos Avançados são reações baseadas na geração de radicais livres, em especial o radical hidroxila. Esses radicais apresentam alta capacidade oxidante e podem degradar diversos compostos poluentes em questão de minutos. A ação dos radicais hidroxilas consiste principalmente em promover o ataque a compostos orgânicos,

transformando-os em dióxido de carbono e água, através de completa oxidação. (Cavalcanti, 2016)

A presença desses radicais livres resulta em taxas de reação que são de 1 milhão a 1 bilhão de vezes mais rápidas do que as observadas com oxidantes químicos convencionais. Portanto, a os processos de oxidação avançado necessitam da geração desses radicais para que possam ser totalmente efetivos. (Reis, 2018)

A eficácia dos processos oxidativos avançado está diretamente relacionada à geração de maneira eficiente dos radicais hidroxilas. Uma vez que sua formação determina o poder oxidativo do sistema. Desta forma, o objetivo principal de qualquer processo oxidativo avançado é gerar, amplificar e utilizar de maneira eficiente o radical hidroxila gerado como um agente oxidante altamente eficaz para a destruição de compostos orgânicos e outros poluentes que não podem ser oxidados por métodos convencionais, a Tabela 01 apresenta diferentes componentes e seus respectivos potenciais de oxidação. (Cavalcanti, 2016)

Tabela 1 - Poder oxidativo de diferentes componentes

<b>Componentes</b>	<b>Potencial de Oxidação Eletroquímica(V)</b>
<b>Flúor</b>	3,06
<b>Radical hidroxila</b>	2,80
<b>Oxigênio (atômico)</b>	2,42
<b>Ozônio</b>	2,20
<b>Peróxido de Hidrogênio</b>	1,78
<b>Permanganato de Potássio</b>	1,70
<b>Hipoclorito</b>	1,49
<b>Cloro</b>	1,36
<b>Dióxido de Cloro</b>	1,27
<b>Oxigênio (molecular)</b>	1,23

Fonte: Reis (2018).

Quando comparado com o cloro, agente oxidativo amplamente utilizado em diversos tratamentos que necessitam da remoção de matéria orgânica, o radical hidroxila demonstra um poder oxidativo mais de duas vezes superior. No entanto, em situações em que o meio apresenta uma carga orgânica significativa, a cloração pode resultar na formação concomitante de compostos organoclorados. (Cavalcanti, 2016)

### 3.3.7 Vantagens do uso de processos oxidativos avançados

As principais vantagens associadas ao uso de tecnologias de processos de oxidação avançados são apresentadas na Tabela 02.

Tabela 2 - Vantagens na utilização dos processos oxidativos avançado

<b>Vantagens dos Processos Oxidativos Avançado</b>
<b>Permite modificações químicas significativas no substrato</b>
<b>Possui propriedade de reagir com contaminantes orgânicos</b>
<b>Degradação de substratos de qualquer natureza química, destacando-se a degradação de contaminantes refratários e tóxicos</b>
<b>Redução na concentração de compostos formados em etapas de pré-tratamento, como aromáticos halogenados</b>
<b>Melhoram a qualidade organoléptica da água tratada, removendo odor e cor</b>
<b>É aplicado para tratar baixas concentrações de poluentes</b>
<b>Possui ampla versatilidade</b>
<b>Pode oxidar diversos contaminantes orgânicos através do radical hidroxila</b>

Fonte: Reis (2018).

Este método permite também melhorias, como associações possíveis, tornando a geração do radical hidroxila mais eficiente permitindo melhores resultados. É possível citar associações como:

- Peróxido de Hidrogênio + ozônio;
- Ozônio + ultravioleta;
- Peroxido de hidrogênio +ozônio + Ultravioleta;
- Reação de Fenton;
- Foto – Fenton;

A escolha da tecnologia adequada varia de acordo com o tipo de poluente que se quer oxidar. Mesmo que o processo de oxidação avançada possa ser usado em qualquer tratamento de oxidação um teste para verificar qual o processo é mais indicado levando em consideração a eficiência, dosagens e custos de processos. A similaridade entre os mecanismos de destruição dos processos oxidativos em compostos orgânicos mostra que a combinação destes processos apresenta melhores resultados quando comparados às técnicas usadas individualmente. (Pereira, 2006)

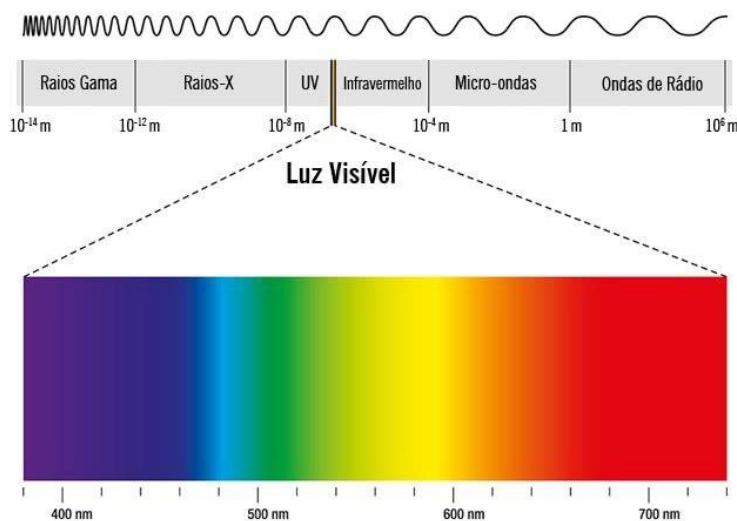
### 3.3.7.1 Ozônio com peróxido de hidrogênio

O ozônio foi descoberto em 1839, por Schonbein que estudava a decomposição eletrolítica da água. Em 1848, Hunt concluiu que o ozônio era a forma alotrópica do oxigênio, possuindo ligações simples e duplas, é um gás instável quando exposto a temperaturas ambientes. O ozônio a temperatura ambiente e em baixas concentrações, apresenta-se como um gás incolor. já em altas concentrações adquire uma coloração azulada. A propriedade que o torna facilmente absorvido pela água é uma característica distintiva. Em termos de capacidade oxidante, o ozônio é um agente extremamente poderoso, o que o torna amplamente utilizado em outras situações além de pré-oxidantes. Em processos de tratamento de efluentes, o ozônio possui dois papéis principais, a oxidação dos materiais de interesse e a precipitação. Ele reage com diversos tipos de contaminantes químicos e elimina uma ampla gama de microrganismos, como bactérias, fungos, bolores e vírus. Quando combinado com peróxido de hidrogênio, o ozônio forma radicais hidroxilas de maneira mais rápida e eficiente, tornando o processo mais vantajoso em sua utilização. (Silva *et al.*, 2023)

### 3.3.7.2 Ozônio com radiação ultravioleta

A luz ultravioleta é uma forma de radiação eletromagnética caracterizada por ter um comprimento de onda menor do que a luz visível, porém é maior do que o raio-X, variando de 100 nm a 400 nm, como visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Faixa de comprimento de onda



Fonte: Pereira (2016)

Os raios ultravioletas além de serem empregados em técnicas avançadas de oxidação, podem por si só, serem aplicados na desinfecção de águas e efluentes, podendo substituir parcialmente a utilização de cloro. A combinação do ozônio com a luz ultravioleta promove a desinfecção e a oxidação avançada de compostos orgânicos. Ao integrar esse sistema com o peróxido de hidrogênio, aumenta-se ainda mais a quantidade de ozônio disponível e, conseqüentemente, a taxa de formação de radicais hidroxilas. Essa abordagem de processos oxidativos avançados sofreu um aumento nas aplicações comerciais, competindo com o sistema do tipo  $H_2O_2/UV$ . (Reis, 2018).

A primeira aplicação dessa tecnologia ocorreu na década de 70 para tratar efluentes contendo cianetos. Este método possui ampla aplicabilidade na degradação de compostos orgânicos, porém devido a particularidade do ozônio possuir uma baixa solubilidade em água, acaba restringindo e limitando o sistema, tornando sua aplicação seletiva aos processos de utilização. (Reis, 2018)

### 3.3.7.3 Peróxido de hidrogênio com ozônio e ultravioleta

O peróxido de hidrogênio é um agente oxidante miscibilidade em água, pode se decompor em água e oxigênio durante a reação, não gerando impactos ambientais, caracterizado como ambientalmente amigável. Apresenta custos de tratamento mais baixos quando comparado com tratamentos envolvendo a utilização de cloro. Sua aplicação não se resume somente a tratamentos de efluentes, o peróxido de hidrogênio é utilizado em outras áreas, como antisséptico, clareamento de cabelo e dentes, recuperação de solos, e branqueamento nas indústrias têxtil, de papel e celulose. (Cavalcanti, 2016)

O peróxido de hidrogênio, juntamente com o ozônio e a luz ultravioleta, constitui um dos reagentes de escolha nos processos de oxidação avançada. Sua elevada reatividade, estabilidade e capacidade de armazenamento em qualquer quantidade são atributos vantajosos. O sistema formado por peróxido de hidrogênio, raios ultravioleta e ozônio envolve uma série de mecanismos atuante para a geração de radicais oxidantes, conferindo-lhe uma superioridade em relação a outros sistemas quando confrontado com efluentes complexos. Esse sistema é menos suscetível aos efeitos negativos da turbidez ou da presença de cor no efluente, além de poder ser aplicado em uma ampla faixa de pH, em contraposição ao sistema formado apenas por peróxido de hidrogênio e raios ultravioleta, entretanto, quando este sistema é adequado para atingir a oxidação desejada, pode se apresentar como uma alternativa mais econômica do que a utilização de ozônio. (Reis, 2018)

É importante a remoção do excesso de peróxido nos efluentes tratados, pois ele interfere diretamente na determinação analítica da Demanda Química de Oxigênio, resultando em valores mais elevados do que o resultado real do efluente tratado. (Cavalcanti, 2016)

#### 3.3.7.4 Reação de Fenton

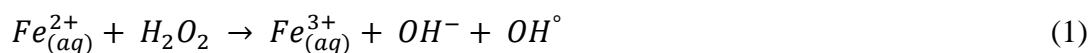
A descoberta de Robert Fenton em 1894, após a observação da oxidação catalítica do ácido tartárico na presença de sais ferrosos e peróxido de hidrogênio relatada por Fenton. Com o passar dos anos, foi notado que outros metais possuem a capacidade de transferir oxigênio, melhorando a eficiência do peróxido de hidrogênio ao gerar radicais hidroxilas altamente reativos. Esse processo é capaz de degradar uma ampla variedade de poluentes orgânicos, como hidrocarbonetos do petróleo, benzenos, MTBE, fenóis, etenos clorados, etanos clorados, PCBs e dioxinas cloradas, possui a capacidade de reduzir a toxicidade e melhorar as condições de biodegradabilidade, diminuindo valores DQO/DBO além de odor e cor. (Cavalcanti, 2016)

A reação de Fenton representa uma abordagem simplificada para a geração de radicais hidroxilas, dispensando a necessidade de reagentes ou equipamentos especiais. A oxidação de compostos orgânicos por meio do reagente Fenton ocorre em solução ácida, na presença de íons ferrosos e peróxido de hidrogênio, por meio de reações em cadeia que conduzem à formação de radicais hidroxilas. Nesse contexto, o ferro exerce a função de catalisador, ao passo que o peróxido de hidrogênio desempenha o papel de agente oxidante. (Reis, 2018)

O íon ferroso utilizado na reação pode ser oriundo do sulfato ferroso ou cloreto férrico, é essencial para otimizar a reação. Os principais requisitos para a reação de Fenton incluem um pH entre 3,0 e 5,0, uma proporção adequada entre os reagentes, tempo de contato entre os reagentes suficiente, vale ressaltar que o tempo varia para cada efluente utilizado, e temperatura e pressão em condições normais. (Cavalcanti, 2016)

Os valores de pH possuem um papel fundamental na formação dos radicais hidroxilas, em condições ácidas, o efeito dos agentes captadores de radicais, especialmente os íons carbonato e bicarbonato, são neutralizados. A reação de Fenton, representada pela Equação 1, é uma reação redox de decomposição do peróxido de hidrogênio, catalisada pelo  $Fe_{(aq)}^{2+}$ , resultando na geração de um radical hidroxila para cada molécula de peróxido de hidrogênio presente no sistema. (Brito; Silva, 2012)

Os radicais hidroxilas podem ser gerados por quantidades mínimas de ferro ou outros metais de transição. Na presença de substratos, como poluentes orgânicos presentes em um efluente, os radicais hidroxilas gerados têm a capacidade de desintoxicá-lo por meio de reações oxidativas.



O íon ferroso ( $Fe_{(aq)}^{2+}$ ) atua como um catalisador na decomposição do peróxido de hidrogênio em um meio ácido, resultando na formação do radical hidroxila. O íon ferroso é continuamente regenerado pela irradiação do ( $Fe_{(aq)}^{3+}$ ) e não é consumido durante a reação de oxidação. (Souza, 2010)

A utilização do processo de Fenton é comumente empregada como alternativa para redução da toxicidade anterior ao tratamento biológico, resultando em uma melhoria das condições de biodegradabilidade do efluente, promovendo a decomposição de moléculas e, simultaneamente, reduzindo a carga orgânica, facilitando as próximas etapas do tratamento. Devido a sua fácil aplicação, esse processo esse processo pode ser utilizado no tratamento de efluentes, uma vez que não necessita de diferentes condições de trabalho, além de ser aplicável a uma ampla variedade de compostos. (Brito; Silva, 2012)

Segundo Rodriguez, as doses dos reagentes peróxido de hidrogênio e sulfato ferroso a serem adicionados no tratamento podem ser estabelecidas com base em uma relação com a DQO (Demanda Química de Oxigênio) do efluente bruto a ser tratado, conforme expresso na Equação 2.

$$H_2O_2 \frac{mL}{L} = \frac{DQO[mgO_2/L]}{141,2[mgO_2/mLH_2O_2]} \quad (2)$$

O valor obtido a partir da Equação 2 representa o volume de peróxido de hidrogênio a 30%, expresso em mililitros, a ser adicionado por litro de efluente a ser tratado. Quanto ao sulfato ferroso, serão utilizadas relações molares que variam de 1:1 a 1:20 de  $Fe^{2+}$  para  $H_2O_2$ . Essa relação é aplicada ao sulfato ferroso heptahidratado. (Reis, 2018)

### 3.3.7.5 Reação de Foto-Fenton

A observação da oxidação de compostos orgânicos sob irradiação de raios ultravioleta na presença de íon férrico em meio ácido remonta à década de 1950, quando foi postulado que a transferência eletrônica iniciada pela irradiação resultava na geração de radicais hidroxilas, responsáveis pelas reações de oxidação. A geração desses radicais a partir da fotólise de espécies de íon férrico trivalente foi também observada em processos de oxidação em água atmosférica e em ambientes aquáticos, sendo considerada responsável pela oxidação de hidrocarbonetos em águas. (Silva *et al.*, 2011)

Quando complexos de  $Fe^{3+}$  são submetidos à irradiação, ocorre a promoção de um elétron de um orbital centrado no ligante para um orbital centrado no metal, fenômeno conhecido como transferência de carga ligante-metal. Esse processo implica na redução do íon férrico ( $Fe^{3+}$  para  $Fe^{2+}$ ) e na oxidação do ligante, conforme representado na Equação 3, resultando na formação de radicais hidroxilas:



A reação é catalítica é estabelecido um ciclo em que  $Fe^{2+}$  é regenerado. A utilização de  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  na presença de  $H_2O_2$  sob ação de uma radiação ultravioleta é chamada de reação foto-Fenton. Sendo os processos fenton e foto-fenton catalisados por íons  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  e considerando que estes íons são hidrolisados formando hidróxidos insolúveis, torna o pH um importante parâmetro na eficiência da reação, pois interfere diretamente na velocidade de degradação de compostos orgânicos. A influência do pH na eficiência de degradação de compostos orgânicos foi avaliada em diversos trabalhos ao longo do tempo, é foi observado que um parâmetro de pH bem mais ácido, era suficiente para proporcionar uma máxima eficiência de degradação. (Silva *et al.*, 2011)

### 3.3.7.6 Reação UV/ $H_2O_2$

Um outro método que também pode ser aplicado para a obtenção direta para geração do radical hidroxila é através da fotoclivagem do peróxido de hidrogênio por meio da irradiação ultravioleta. O processo envolvendo o peróxido de hidrogênio e a radiação ultravioleta pode gerar dois radicais hidroxila, radicais esse que possuem papel fundamental na degradação da matéria orgânica presente no meio. Através da equação 4 é possível visualizar a presença dos dois radicais. (Araujo; Yokoyama; Teixeira, 2006)



O processo envolvendo UV e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> apresenta uma alta eficiência quando aplicado em tratamento de água que possuem contaminações de nitrosaminas, componentes alifáticos, halogenados, benzeno, tolueno, clorobenzeno, fenol, clorofenól e dimetilftalato além de resíduos químicos gerados por indústrias de celulose. Além dos inúmeros componentes com o qual o processo possui aplicabilidade, também é possível ressaltar que é um material oxidante com manuseio simples e de grande solubilidade em água e não necessita de nenhuma etapa de separação após o término. (Tambani, 2011)

### 3.3.8 Planejamento fatorial

Planejamento experimental, é anteceder uma rotina de coletas de resultados a partir de uma série de experimentos. Sua aplicação implica diretamente em diversas vantagens, como na redução do número de ensaios realizados, evitando desperdícios de reagentes, sem prejuízos além de manter a qualidade das informações. Também permite um estudo simultâneo de inúmeras variáveis, podendo avaliar cada efeito de maneira separada. Em estudos com diversas variáveis, através de um planejamento experimental, é possível reduzir o número de ensaios, além de uma maior seletividade das variáveis que possuem uma grande interação com o processo. Por fim, garante uma determinação mais confiável dos resultados, por meio de expressões matemáticas, o que possibilita um resultado mais concreto. (Button, 2005)

Dentre todos os diversos métodos de planejamentos experimentais apresentados na literatura, o planejamento fatorial é o ideal para aplicação de casos com influência de duas ou mais variáveis. O planejamento fatorial é retratado por  $b^K$ , onde K representa o número de fatores que serão estudados, e o termo em 'b', o número de níveis determinado. Na grande maioria dos estudos de caso, o planejamento é composto por apenas 2 níveis, ou seja, o planejamento possui uma relação de  $2^K$ , desta forma, é possível dizer nestes casos, que o número de interações é baseado no número de variáveis determinadas. Os níveis de interação dentro do planejamento fatorial, define parâmetros, máximo e mínimo, em que as variáveis serão submetidas durante os experimentos, permitindo travar um limite mínimo e máximo por onde o programa fará a distribuição das interações. (Neves *et al.*, 2002)

## 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A linha de pesquisa foi dividida em 4 etapas conforme observado na Figura 3:

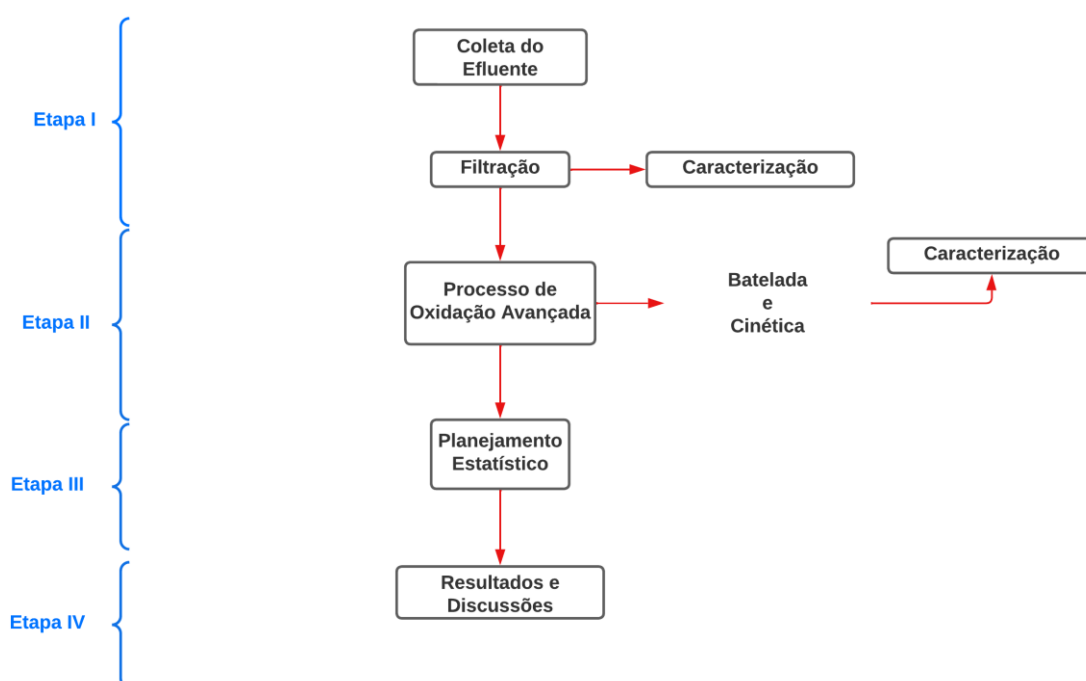
Etapa I – Remoção do particulado;

Etapa II – Aplicação do Processo de Oxidação Avançada;

Etapa III – Desenvolvimento do planejamento estatístico;

Etapa IV – Resultados e Discussões;

Figura 3 - Fluxograma experimental



Fonte: autoria própria.

### 4.1 Local da coleta

São Paulo é umas das vinte e 27 unidades federativas do Brasil. É localizada na região sudeste, fazendo divisa com os estados de Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro e Mato Grosso do Sul, além do Oceano Atlântico, conforme destacado na Figura 4.

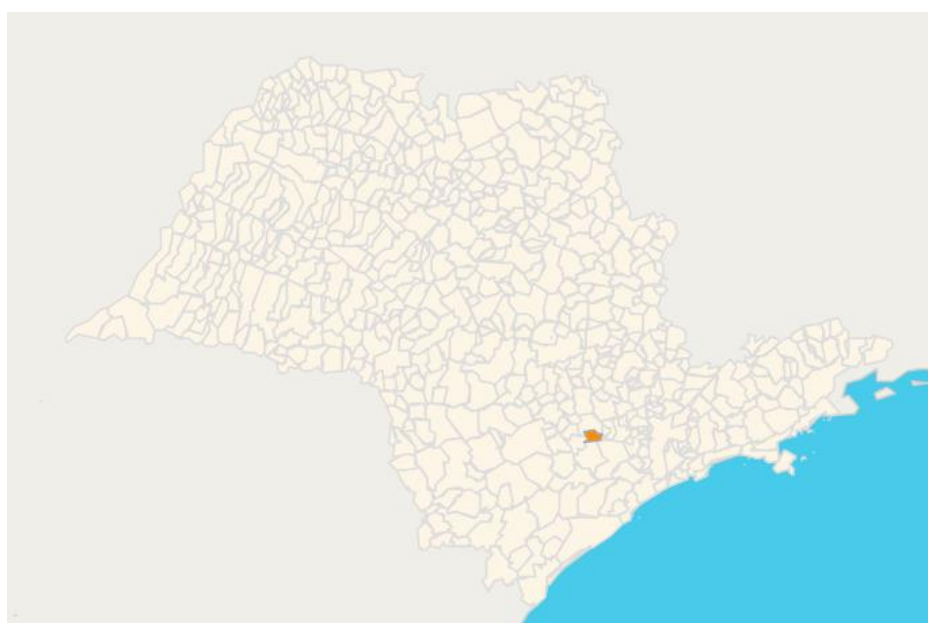
Figura 4 - Localização do estado de São Paulo



Fonte: IBGE, (2022).

O estado de São Paulo, possui 248.219.485 km<sup>2</sup> de área e 44.411.238 pessoas. Dentro do seu limite, contém 645 cidades, dentre elas, localizado no interior do estado, Votorantim é um município com um número próximo à 127.923 habitantes, ocupando uma área de 184.186km<sup>2</sup>. Possui 96,1% de domicílios com esgotamento sanitário adequado, 83,4% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 58,2% de domicílios urbanos em vias públicas com presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio. (IBGE, 2022).

Figura 5 - Localização da cidade de Votorantim



Fonte: IBGE, (2022).

Informações fornecidas no ano de 2020, indicam que a cidade produz aproximadamente 140 toneladas de resíduos domiciliares por dia. Este material produzido é enviado diretamente para o aterro sanitário localizado na cidade. Uma vez no aterro, o material é dividido em pontos, devido a exposição do rejeito sólido é possível encontrar chorume misturado com água de chuva, situação essa, preocupante, pois o material é poluente, além de apresentar um odor forte e nocivo ao meio ambiente, como também colocar a saúde das pessoas e animais em risco. (Scinocca, 2022)

Figura 6 - Aterro Sanitário do Município de Votorantim



Fonte: Aterro[...](2024).

## **4.2 Coleta do material**

O chorume produzido pelo Aterro de Votorantim é alocado em um local separado, onde o resíduo é armazenado a céu aberto, apenas com uma proteção por grades, até atingir as condições de remoção. A coleta foi realizada no dia 20/01/2023, durante o momento da coleta ocorreu uma chuva fina, com vento fraco e temperatura de 24,00 °C. Não houve chuva nas últimas 24 horas. Ao total, foram coletados 15 litros de chorume para posterior análise em laboratório.

## **4.3 Caracterização do efluente**

Para que seja possível acompanhar a linha de tratamento do material poluente, foi realizada uma caracterização do efluente, as amostras do chorume coletadas foram acondicionadas em garrafas de polipropileno com capacidade de 5 L, estas, esterilizadas com ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) a uma concentração de 5 % (v/v) e água destilada para evitar qualquer contaminação externa no momento da armazenagem do material. (Dias, 2022)

## **4.4 pH do efluente**

O pH da amostra coletada, foram analisados através de um pHmetro de bancada da marca Thermo Scientific, modelo Orion Star A221. Este, foi acompanhado durante todo o processo.

## **4.5 Cor**

Devido a sua propriedade de origem o chorume apresenta uma cor turva e densa, e mudança é um indicativo para a efetividade do processo, deste modo foi realizado uma varredura de comprimento de onda de buscando encontrar o comprimento de onda de máxima absorção do chorume e deste modo conduzir as análises visuais, avaliando a mudança da cor no decorrer das etapas. (Brito, 2011)

Para essa etapa, foi utilizado o equipamento Espectrofotometro, modelo DR3900, da marca Hach.

## 4.6 Processo de oxidação avançada

A segunda parte do processo, foi aplicada baseado nos estudos desenvolvidos por Pacheco (2004), utilizando um sistema, cuja radiação provida de uma lâmpada ultravioleta, e adição de  $H_2O_2$  apresentou 97 % de redução da coloração do efluente, trabalhando com condições ácidas, utilizando um valor de pH igual à 1,00. A concentração que melhor apresentou resultados, foram na situação de 1000 mg/L  $H_2O_2$  com concentração de 10% (m/m) adicionadas antes do início do experimento, e mais 3 acréscimos durante o decorrer do tempo, porém com contrações menores, de 200 mg/L, em tempos definidos em 30, 60 e 90 minutos após o início, todo o processo ocorreu em um tempo total de tratamento de 120 minutos. (Pacheco, 2004)

Para essa aplicação, utilizou-se um reator convencional, composto de um de béquer, lâmpada ultravioleta e um agitador magnético. O procedimento de operação foi baseado no sistema descrito por (Pacheco, 2004), apresentando resultados satisfatórios. O sistema montado avaliará a cinética do tratamento secundário. Este ponto foi de extrema importância, pois através dele foi possível detectar otimizações na etapa, ocasionando em trabalhar com menores tempos de reação.

Definido as condições de aplicação do tratamento secundário foi avaliado a cinética de oxidação do tratamento. Nesta etapa, alíquotas do efluente foram retiradas em intervalos de 15 minutos e realizada a leitura da coloração do efluente no espectrofotômetro e turbidez, por meio do turbidímetro da marca Hach, modelo 2100Q.

## 4.7 Planejamento fatorial

### 4.7.1 *Minitab*

Possui uma ampla aplicação, desde funções para o gerenciamento de processos, ferramentas da qualidade, avaliações estatísticas e planejamentos experimentais. O *Minitab* possui uma interface semelhante ao Excel, porém apresenta funções mais amplas, além de suas aplicações estatísticas. O *Minitab* é utilizado por empresas e instituições acadêmicas, devido a diversas aplicações, com ferramentas de nível básico ao avançado, tornando os resultados mais confiáveis e robustos.

#### 4.7.2 Estudo fatorial

Com intuito de realizar uma avaliação das condições do processo de oxidação avançada, foram escolhidas as variáveis de tempo, concentração de chorume e pH. Através da Tabela 3, é possível visualizar com foram dispostas as condições de cada experimento.

Tabela 3 - Planejamento fatorial

pH	Diluição do chorume	Tempo (minutos)
1,00	Diluição de 1:2	15
1,00	Sem diluição	60
8,00	Sem diluição	60
8,00	Sem diluição	15
8,00	Diluição de 1:2	60
1,00	Sem diluição	15
1,00	Diluição de 1:2	60
8,00	Diluição de 1:2	15

Fonte: Autoria própria.

A variável controle avaliada foi a geração de carbono total, utilizando um Analisador de Carbono Orgânico Total, da marca Analytikjena, modelo Multi N/C 3100. Dessa forma, buscou uma melhor condição em que as variáveis efetuassem uma melhor remoção de carbono total presente no chorume.

#### 4.8 Forma de análise dos resultados

Os experimentos foram realizados em triplicata, garantindo uma replicabilidade dos ensaios. Bem como cada análise ocorreu em equipamentos devidamente calibrados, garantindo a precisão dos resultados e medições.

Cada etapa de tratamento foi avaliada e discutida separadamente, visando uma melhor profundidade nos resultados e métodos aplicados durante o decorrer dos ensaios.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização do lixiviado

Antes da realização dos ensaios, o lixiviado (bruto ou pré-tratado) coletado no aterro sanitário de Votorantim foi caracterizado. A Tabela 4 apresenta a caracterização do lixiviado utilizado em cada ensaio.

Tabela 4 - Resultado das caracterizações

<b>Parâmetros analisados</b>	<b>Resultados</b>	<b>Unidades</b>
<b>Turbidez</b>	282	NTU
<b>Cor real</b>	2800	uH
<b>Cor aparente</b>	5940	uH
<b>Oxigênio Dissolvido</b>	0,48	mg/L
<b>Demanda Biológica de Oxigênio</b>	1.368,35	mg/L
<b>Demanda Química de Oxigênio</b>	4.987,10	mg/L
<b>pH</b>	8,44	-
<b>Sólidos Dissolvidos Fixos</b>	3323,00	mg/L
<b>Sólidos Dissolvidos Totais</b>	5459,00	mg/L
<b>Sólidos Dissolvidos Voláteis</b>	2136,00	mg/L
<b>Sólidos Sedimentáveis</b>	<1,0	mg/L
<b>Sólidos Suspensos Fixos</b>	<25	mg/L
<b>Sólidos Suspensos Totais</b>	120,00	mg/L
<b>Sólidos Suspensos Voláteis</b>	111,00	mg/L
<b>Sólidos Totais Fixos</b>	3520,00	mg/L
<b>Sólidos Totais Totais</b>	5503,00	mg/L
<b>Sólidos Totais Voláteis</b>	1983,00	mg/L
<b>escherichia coli</b>	Presença	-
<b>Bactérias Heterotróficas</b>	Presença	-
<b>Carbono Orgânico Total</b>	446,00	mg/L
<b>Carbono Inorgânico Total</b>	815,00	mg/L
<b>Carbono Total</b>	1261,00	mg/L

Fonte: Autoria própria.

Através da Tabela 4, foi possível avaliar algumas condições da amostra, como sua coloração altamente elevada, com um resultado de 5940 uH. Um fator impactante do Chorume é sua variabilidade, ocasionando facilidades ou dificuldades em seu tratamento. A caracterização neste caso, indica os principais contaminantes presente no chorume, fator esse que pode variar conforme a época em que se é realizada a coleta.

Oxigênio Dissolvido, é um fator limitante, pois indica os estados de autodepuração em sistemas naturais, como rios, lagos, represas e muito aplicado em estações de esgoto. Com um resultado de 0,48 mg/L a amostra apresenta uma seria possibilidade de modificação da vida aquática caso entre em contato com aquíferos que possuam vida.

Demanda Bioquímica de Oxigênio, reflete a quantidade de oxigênio que é consumida por microrganismos que estão no meio analisado. Este é um parâmetro muito empregado para se avaliar o estado de poluição das águas. Desta forma, quanto maior a demanda bioquímica de oxigênio, mais poluído é o meio, pois não se há decomposição de compostos orgânicos. Por consequência, quanto menor a demanda bioquímica de oxigênio, mais limpo é o meio analisado. (Valente; Padilha; Silva, 1997)

Com uma demanda bioquímica de oxigênio de 1.368,35 mg/L, é possível afirmar que esta amostra se encontra totalmente poluída.

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) corresponde à quantidade de oxigênio consumido por materiais e substâncias orgânicas e minerais que se oxidam sob condições experimentais definidas. No caso de águas, a grandeza caracteriza-se como um parâmetro importante por estimar o potencial poluidor (no caso, consumidor de oxigênio) de efluentes domésticos e industriais, assim como o impacto destes sobre os ecossistemas aquáticos. (Aquino; Silva; Chernicharo, 2006)

A análise da Demanda Química de Oxigênio é um parâmetro utilizado como indicador da concentração de matéria orgânica presente em águas superficiais ou em efluentes de esgoto, sendo muito aplicado como monitoramento de estações de tratamento, avaliando o processo de contaminação de efluentes industriais, urbanos e rurais. (Aquino; Silva; Chernicharo, 2006)

O carbono total é uma medida direta que corresponde a quantidade de matéria orgânica presente em uma amostra líquida, não possuindo distinção sobre a natureza da matéria, o que permite trabalhar com matérias biodegradáveis. A presença de carbono orgânico em águas correspondem à diversidade de compostos orgânicos em vários estados de oxidação.

Para amostra de chorume, foi possível detectar através da análise que é um material rico em matéria orgânica, pois ele possui cerca de 1261,0 mg/L de carbono. A remoção do carbono total indica possíveis remoções de contaminantes orgânicos.

## 5.2 Etapa primaria - Filtração

A primeira etapa envolveu a separação da matéria orgânico sobrenadante presente no chorume. Esta etapa ocorreu por meio da passagem da água por um material filtrante, com objetivo de remover partículas suspensas presente na amostra. Este processo ocorre até o momento de saturação do material filtrante, e sua velocidade de saturação varia de acordo com a quantidade de sólidos presentes na amostra. Assim que os poros do material filtrante estão completamente preenchidos, o fluxo de água é interrompido e trocasse o material.

O procedimento para esta etapa, foi realizado por meio de um conjunto para filtragem a vácuo conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Conjunto para realização da primeira etapa



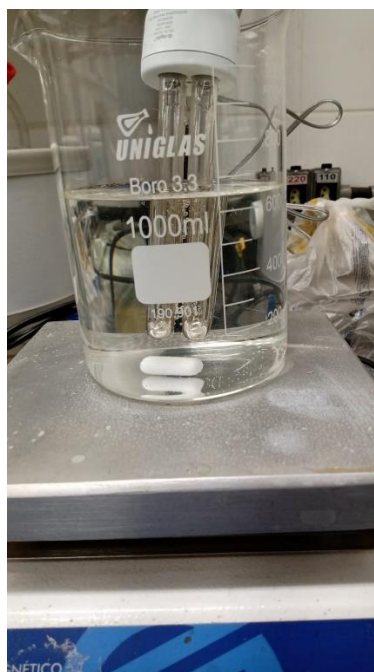
Fonte: Autoria própria.

Somente por uma comparação visual já é possível notar a diferença entre as etapas, o chorume, na parte superior é a amostra bruta, apresentando uma coloração de 5940 uH, e na parte inferior, é a amostra após a etapa de filtração, logo na primeira etapa a coloração cai para 2800 uH, removendo cerca de 53% da coloração.

### 5.3 Etapa secundária – Processo oxidativo avançado

Uma vez com a maior parte da matéria suspensa na amostra ser removida, foi iniciada a segunda etapa, o processo oxidativo avançado. Os ensaios ocorreram em um béquer de 1000 mL. Os estudos foram aplicados com uma amostra de 300 mL de chorume. Inicialmente é acrescentado uma quantidade de peróxido de hidrogênio, respeitando a razão de 1000 mg para cada litro de efluente. Doses adicionais de peróxidos eram acrescentadas nos intervalos de 30 e 60 minutos, porém com razão de 200 mg para cada litro de efluente. O tempo total de ensaio foi de 90 minutos, pois neste tempo já foi possível remover grande parte da coloração. Como geração de raios ultravioleta, foi utilizada uma lâmpada UV de 14W e 127 V, a Figura 8 representa o sistema montando.

Figura 8 - Sistema do processo Oxidativo Avançado



Fonte: Autoria própria.

### 5.4 Ensaio utilizando um sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Considerando que a radiação UV é um forte oxidante e quando utilizado junto do peróxido de hidrogênio, que também é um oxidante forte, o processo de oxidação é potencializado devido a ótima sinergia entre estes dois oxidantes. Esse conjunto de aplicação UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> é eficiente para degradar inúmeros substratos orgânicos, dentre eles é possível citar o fenol, corantes têxteis e acetonas.

Antes de iniciar o experimento, o pH foi ajustado para valores próximos de 1,00 através da adição de ácido clorídrico. Nessas condições os ácidos húmicos se precipitam devido à protonação de grupos carboxilados, ocasionando uma diminuição da solubilidade no meio, fator esse que favorece a degradação dos componentes presentes no chorume.

### 5.5 Cinética do processo de oxidação avançada

A cinética de uma reação química é extremamente importante, pois através dela é possível avaliar como se ocorre a velocidade de uma reação, além de adaptações no tempo envolvido em cada parte, buscando melhores resultados aplicados nos menores tempos.

Para o processo de oxidação avançada, foram coletadas alíquotas nos intervalos de 15, 30, 45, 60, 75 e 90 minutos, a fim de avaliar como o processo da remoção da coloração e turbidez ocorrem no decorrer da corrida experimental, conforme apresentado na Figura 9, é possível visualizar as alíquotas retiradas após cada tempo predeterminado.

Figura 9 - Cinética de reação



Fonte: Autoria própria.

Nas Tabelas 5 e 6, é possível avaliar como a redução da coloração, Turbidez e DQO em cada intervalo de tempo.

Tabela 5 - Resultados da Cinética de reação

<b>Tempo (minutos)</b>	<b>Média da cor (uH)</b>	<b>Desvio (uH)</b>	<b>Média da turbidez (NTU)</b>	<b>Desvio (NTU)</b>
0	2800	-	282,00	-
15	192	55	11,62	3,39
30	117,5	26,5	9,03	2,38
45	66,5	21,5	6,55	2,63
60	54,5	23,5	6,07	2,82
75	35	15	5,01	2,40
90	23	7	3,87	1,43

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 - Remoção de cor e turbidez

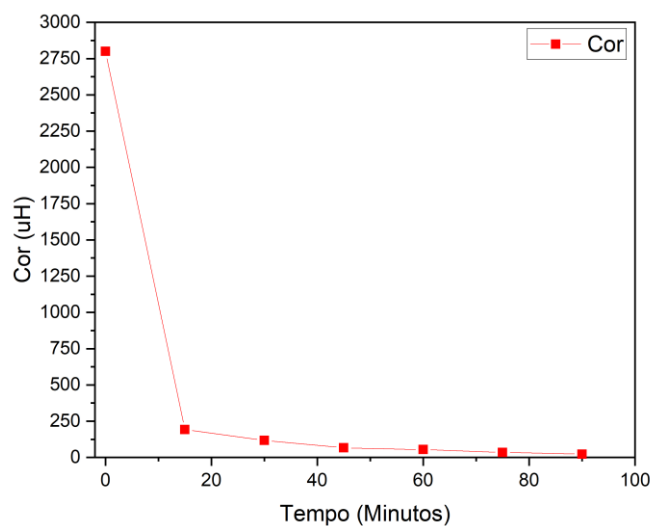
<b>Tempo(minutos)</b>	<b>% Remoção da Cor</b>	<b>% Remoção da Turbidez</b>
0	0,00%	0,00%
15	93,14%	95,88%
30	95,80%	96,80%
45	97,63%	97,68%
60	98,05%	97,85%
75	98,75%	98,23%
90	99,18%	98,63%

Fonte: Autoria própria.

## 5.6 Cor

O processo teve início com uma cor de 2800 uH, logo nos primeiros 15 minutos, é possível notar a diminuição na coloração, chegando ao valor de 192 uH, aproximadamente 93,14% de remoção da coloração. Através da Figura 10, é possível avaliar a queda da coloração em relação ao tempo de exposição à radiação.

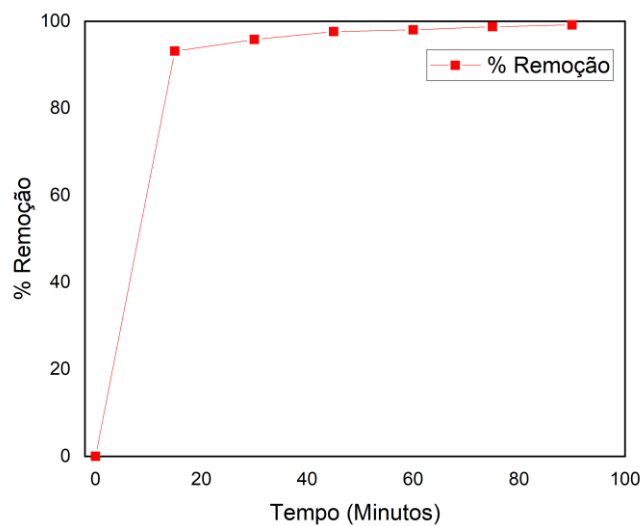
Figura 10 - Coloração em função do tempo



Fonte: Autoria própria.

A velocidade e eficiência do método é notável, a Figura 11, retrata a eficiência de remoção da coloração.

Figura 11 - Eficiência de remoção da coloração



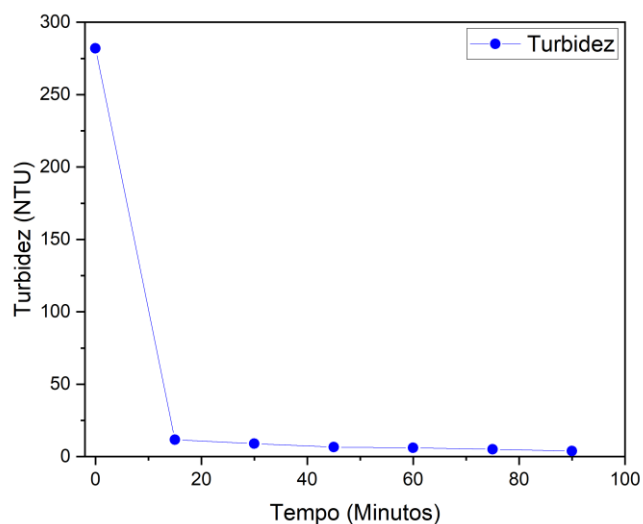
Fonte: Autoria própria.

Após os primeiros 15 minutos a remoção da coloração continuou aumentando, chegando a 99,18% de remoção em apenas 90 minutos de experimento.

## 5.7 Turbidez

No tempo inicial, a turbidez apresentou um valor de 282 NTU. Após os primeiros minutos, seu valor caiu para 11,62 NTU, resultando em 95,88% de remoção na turbidez. É possível visualizar a variação da coloração em função do tempo através da Figura 12.

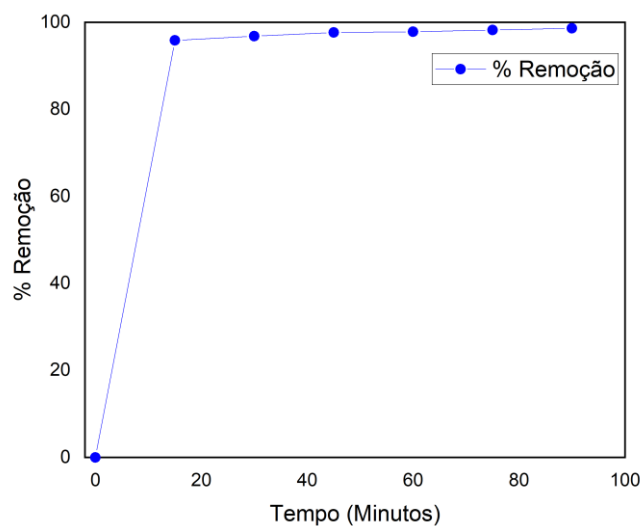
Figura 12 - Turbidez em função do tempo



Fonte: Autoria própria.

A eficiência de remoção da turbidez também é alta logo nos primeiros minutos de reação. Através da Figura 13, é possível visualizar a eficiência da remoção da turbidez em função do tempo.

Figura 13 - Turbidez em função do tempo



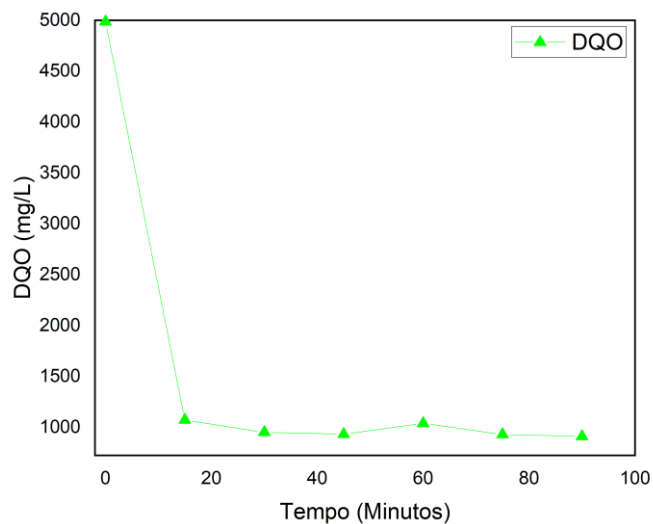
Fonte: Autoria própria.

Após os primeiros 15 minutos a remoção da turbidez continuou aumentando, chegando a 98,63% de remoção em apenas 90 minutos de experimento.

## 5.8 Demanda Química de Oxigênio

A demanda química de oxigênio apresentou uma diminuição quando comparada com o tempo zero. Na Figura 14, é possível observar a queda dos valores de DQO a medida em que o processo ocorre.

Figura 14 - Demanda Química de Oxigênio em função do tempo



Fonte: Autoria própria.

A remoção da DQO também é alta quando comparada com a amostra inicial. Já nos primeiros 15 minutos a remoção apresentada chega a 78,4%.

Portanto, através das análises de DQO e alguns parâmetros físico-químicos, já é possível constatar a velocidade e eficiência do processo oxidativo utilizando peróxido de hidrogênio junto com uma fonte de radiação ultravioleta. Além de uma velocidade de oxidação elevada, é possível chegar a valores de remoção próximos de 99% em uma quantidade de tempo não tão elada.

Desta forma, o ensaio cinético se mostrou satisfatório, pois através dele foi possível observar o tempo de reação, onde com apenas 30 minutos e somente a adição inicial de peróxido de hidrogênio, a remoção da coloração atingiu 94,8% e a turbidez 95,9%.

Os processos oxidativos avançados que fazem uso são processos amplamente estudados em aplicações de lixiviados provenientes em aterros sanitários. Sua efetividade varia de ambas as técnicas podem alcançar de 15 a 95% de remoção os parâmetros. A aplicação do peróxido de hidrogênio como oxidante no tratamento de efluentes combinados com a utilização de luz ultravioleta promove ótimos resultados. Além de ser um agente oxidante com algum potencial de redução, sua aplicação é segura e de baixo custo de aplicação (Seewald, 2013).

Quando comparados com outros processos, fica evidente a sua eficiência utilizando de baixa complexidade e riscos. Quando comparado com o trabalho desenvolvido por Wang;

El-din e Smith, (2004), em que a aplicação de 1200 mg/L de ozônio juntamente com 630 mg/L de peróxido de hidrogênio, foi possível uma remoção de 90% da coloração ao lixiviado antigo bruto.

Wu *et al.*, (2004), aplicou um processo semelhante, porém, além da utilização de ozônio isolado e ozônio junto com peróxido de hidrogênio, também foi aplicado um processo de ozonização em combinação com radiação UV. A concentração de ozônio utilizada foi de 1200 mg/L, já o peróxido de hidrogênio, foi adicionado à uma razão de 1,0 grama para cada grama de ozônio. Em todos os casos estudados, a coloração obteve uma eficiência de remoção de 90%.

Tizaoui *et al.*, (2007), buscou o tratamento do lixiviado proveniente do aterro sanitário na Tunísia. O lixiviado contia alta DQO, superior a 5230 mg/L. O tratamento por processo oxidativo avançado utilizando ozônio e peróxido de hidrogênio, alcançou uma remoção de 94% da cor. Também foi possível identificar que a concentração ótima de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> foi de 2000 mg/L.

O processo H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV é eficiente na remoção de cor em águas contaminadas, como no estudo desenvolvido por Polezi (2003), em que houve a redução em cerca de 60% da cor, 30% da turbidez e 60% de DQO, evidenciando ser um processo de degradação de compostos. Também foi evidenciado que o processo possui uma alta eficiência na degradação de organismos, removendo 99% dos coliformes totais.

## 5.9 Carbono total

É o parâmetro de maior relevância para quantificar a matéria orgânica em amostras de água e efluentes aquosos. O carbono total de uma amostra de água pode ser composto de carbono orgânico total e carbono inorgânico total. Na amostra de chorume, o valor do carbono inorgânico total foi de 815,00 mg/L, já o carbono orgânico total de 446,00 mg/L, portanto o valor do carbono total foi de 1261,00 mg/L com um desvio total de 2,36%. Após o ensaio cinético finalizado, a amostra de 90 minutos foi analisada a fim de descobrir a quantidade final de carbono total na amostra após o tratamento. Seu resultado de carbono inorgânico total foi de 6,69 mg/L e o carbono orgânico total de 40,95 mg/L, obtendo um resultado de carbono total igual a 47,64 mg/L com um desvio de 1,30%.

A aplicação do método se mostrou bem favorável para a redução de carbono total na amostra de chorume, possibilitando uma redução de 96,22% do carbono presente na amostra,

evidenciando que além das remoções de coloração, turbidez, DBO o método também apresenta uma boa eficiência para remoção de carbono orgânico, inorgânico e total.

### 5.10 Resultado do planejamento fatorial

Após à realização dos experimentos, foram analisados o resultado da remoção de carbono total para cada situação, obtendo a Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado carbono total

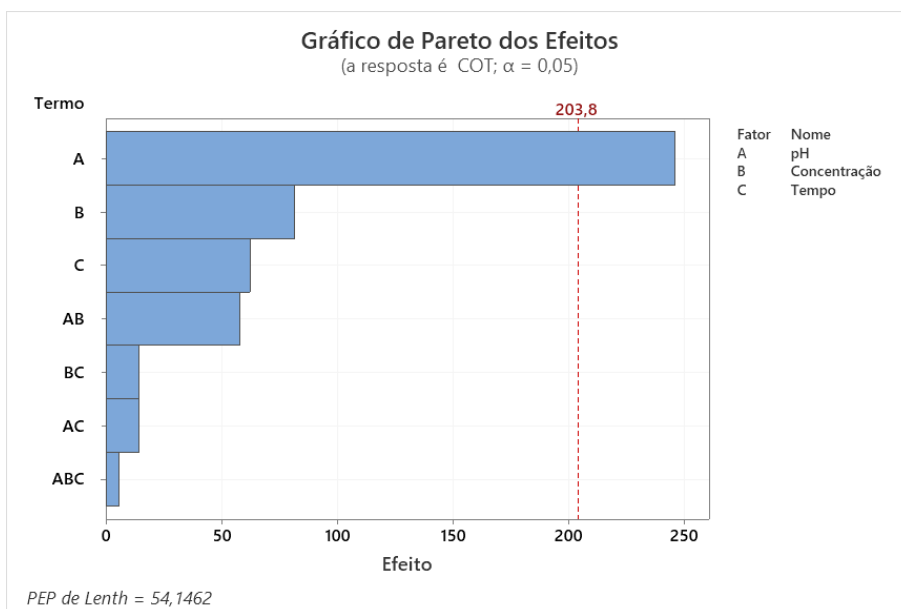
pH	Diluição do chorume	Tempo (minutos)	Carbono Total (mg/L)	Desvio
1,00	Diluição de 1:2	15	131,50	1,69%
1,00	Sem diluição	60	78,77	4,24%
8,00	Sem diluição	60	390,60	0,73%
8,00	Sem diluição	15	459,20	0,64%
8,00	Diluição de 1:2	60	271,80	0,62%
1,00	Sem diluição	15	163,90	0,09%
1,00	Diluição de 1:2	60	63,66	1,82%
8,00	Diluição de 1:2	15	299,70	0,15%

Fonte: Autoria própria.

Com o auxílio do programa estatístico foi possível gerar o gráfico de Pareto, este diagrama ordena a importância dos fatores, partindo do mais influente para o menor. O gráfico de Pareto exibe o valor absoluto dos efeitos, é possível determinar quais efeitos são de maior e menor influência, mas não é possível determinar quais efeitos aumentam ou diminuem a resposta.

Logo, por meio da Figura 15, foi possível que concluir que a principal variável para este modelo é o pH do chorume, ou seja, sua variação implica em resultados significativos na redução do carbono total. As demais variáveis não possuem tais significâncias, nem suas interações.

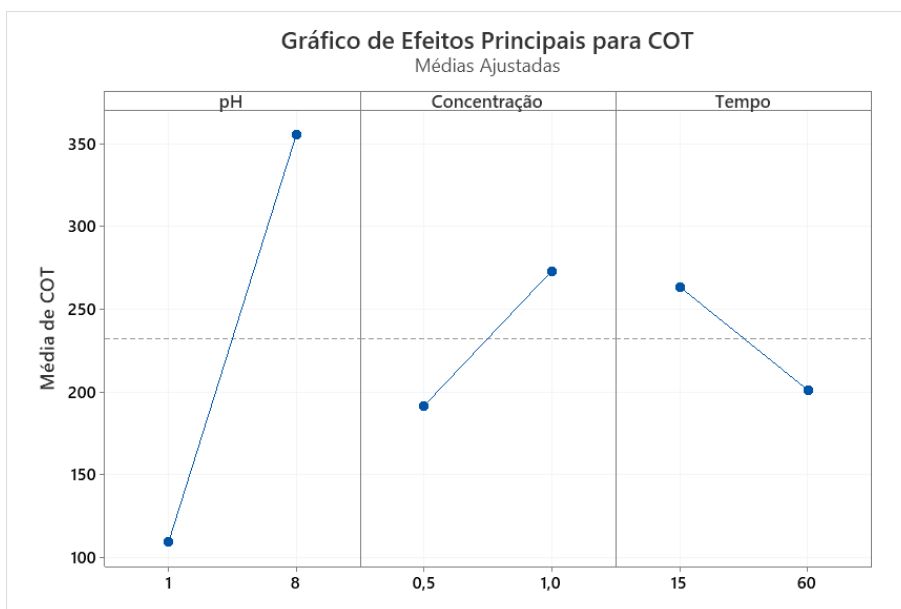
Figura 15 - Gráfico de Pareto



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 16, é apresentado um gráfico de efeitos principais, esse gráfico tem por intuito indicar cada variável e como a sua variação pode interferir na remoção de carbono total. E concordando com o gráfico de Pareto, a variável que mais apresenta um impacto direto no resultado é a variação do pH, onde a sua variação pode ocasionar uma diferença de até 250 mg/L, enquanto para as demais variáveis, a variação da remoção de carbono total não é tão elevada.

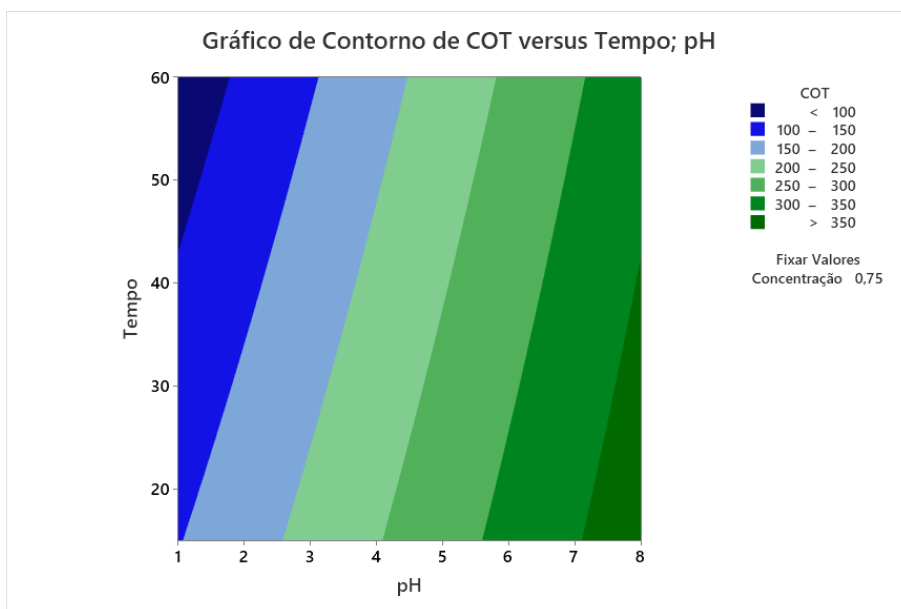
Figura 16 - Gráfico de Efeitos Principais



Fonte: Autoria própria.

Como forma de indicar as condições ótimas para o modelo, foram gerados gráficos de Contorno. Estes, exibem uma varredura que possui indicar cada região de carbono total conforme a variação do parâmetro é realizada. Na Figura 17, foram comparadas as variáveis pH e Tempo. Foi possível concluir através dele, que para valores menores de 100 mg/L de carbono, se faz necessário trabalhar com um pH menor que ou igual a 1, e um Tempo maior que 60 minutos.

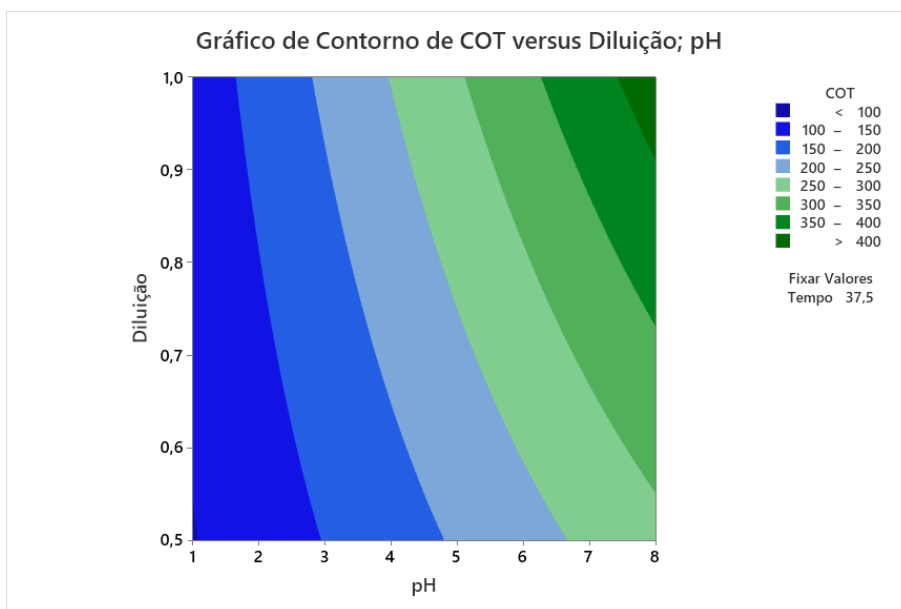
Figura 17 - Gráfico de contorno pH vs Tempo



Fonte: Autoria própria.

Já na Figura 18, foram comparadas as variáveis concentração e pH. Foi possível concluir através dele, que para valores entre 100 e 150 mg/L de carbono, se faz necessário trabalhar com um pH menor que ou igual a 3, e a diluição ser opcional. Porém, no meio básico, a diluição já faz diferença, se o sistema trabalhar com pH 8 e sem diluir, os resultados esperados são entre 350 até 400 mg/L de carbono, mas se feito com o mesmo pH e com uma diluição de 50%, o resultado esperado já cai para entre 250 e 300 mg/L de carbono.

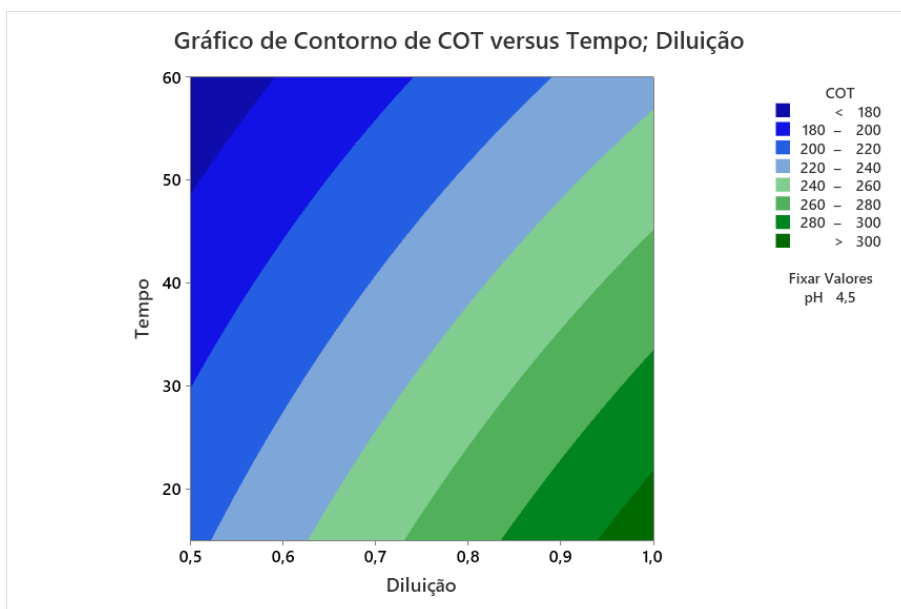
Figura 18 - Gráfico de contorno Diluição vs pH



Fonte: Autoria própria.

Por fim, o último gráfico de contorno apresentado na Figura 19, retrata a interação entre o Tempo o fator de diluição do chorume. Foi possível concluir que para obtenção de possíveis resultados menores que 100mg/L se faz necessário a diluição do chorume, porém um tempo experimental de mais de 50 minutos. Através dessa análise é possível visualizar que com a diluição do chorume, é possível obter resultados entre 200 e 220 mg/L de carbono total logo com 15 minutos. Ou seja, a diluição impacta no tempo que o processo deve ocorrer.

Figura 19 - Gráfico de contorno Tempo vs Diluição

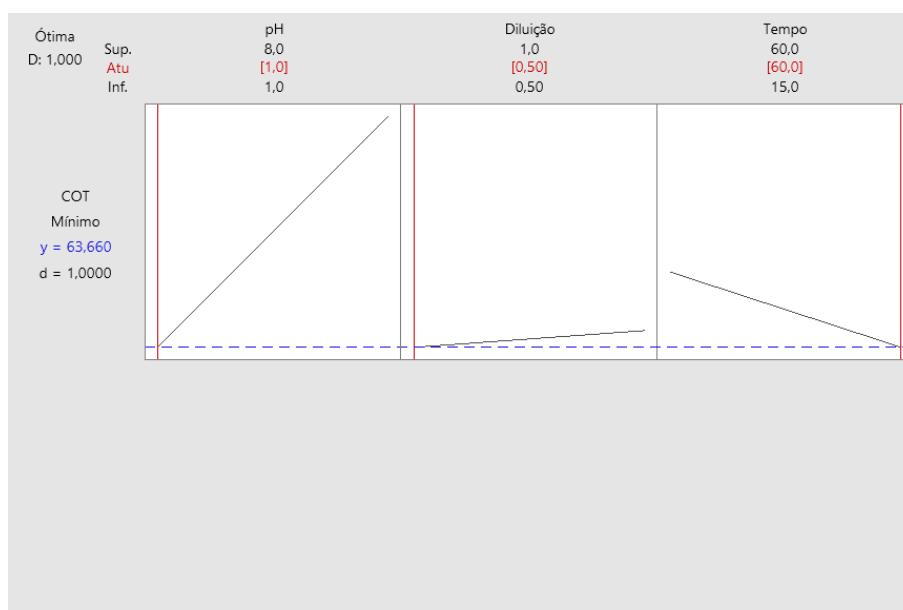


Fonte: Autoria própria.

Os gráficos de contorno possuem importância justamente para concluir condições e interações, de qual maneira a diluição, tempo e pH interfere diretamente na remoção de carbono total.

Por fim, a Figura 20, foi obtida através da realização da otimização do processo, essa ferramenta dentro do software, permite indicar quais as condições necessárias para obter o menor resultado de carbono total. Portanto, foi possível concluir que para este sistema, o desenvolvimento do processo oxidativo avançado utilizando o chorume com pH igual a 1, a amostra diluída em 2 partes e o tempo de 60 minutos, é possível obter os menores resultados de carbono total. Resultado esse que corrobora com os demais apresentados.

Figura 20 - Gráfico de otimização



Fonte: Autoria própria.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi possível avaliar cada etapa presente no tratamento do chorume de forma separada, evidenciando a interação de cada fase. Na primeira etapa, se trata de uma remoção física, buscando eliminar os materiais em suspensão presente na amostra. Esta etapa se mostrou importante para o processo, pois através dela cerca de 53% da coloração foi removida. Além da remoção da coloração, a etapa de filtração pode garantir uma melhor eficiência das etapas subsequentes, retirando possíveis interferentes no meio que será estudado.

A segunda etapa, utilizando do processo de oxidação avançada, foi possível comprovar a efetividade do método através dos resultados de coloração e turbidez. A remoção da coloração foi de 98,9%. Agregado com a coloração, a sua turbidez também houve uma eficiência significativa de 98,1%, evidenciando e confirmando a importância e eficiência do processo oxidativo avançada como segunda etapa do tratamento. A mudança física dos aspectos de coloração, são um grande indicativo da degradação da matéria presente na amostra. A demanda química de oxigênio também foi avaliada, com intuito de estudar outros impactos na aplicação da etapa secundária, neste quesito a remoção foi de 81,7%.

Por meio de um estudo cinético, foi possível avaliar o tempo de reação do processo, alíquotas foram retiradas nos tempos de 15, 30, 45, 60, 75 e 90 minutos. Através dessa aplicação, é evidente a velocidade de reação do processo oxidativo avançado. O processo utilizando a reação com  $H_2O_2$  e luz UV, se mostrou muito rápido, logo nos primeiros 15 minutos de exposição, a remoção da coloração foi de 93,4% e a turbidez foi de 95,8%, valores esses excelentes para o tempo rápido de aplicação. O método de oxidação avançada se mostrou eficiente quanto na remoção da coloração, da turbidez, da DQO e do carbono total.

Com a aplicação do planejamento fatorial, foi possível compreender melhor o funcionamento do processo oxidativo avançado, visualizando as melhores condições para que o processo ocorra, bem como quais variáveis foram mais significativas para o processo, evitando desperdício de tempo e reagentes. Portanto, o processo oxidativo avançado utilizando  $H_2O_2$  e UV se mostrou muito eficiente para aplicação com chorume após uma etapa primária de remoção de sólidos. Este método atuou de forma rápida, que quando agregado com um planejamento fatorial, torna o processo mais adequado e assertivo. Possuindo ferramentas para auxiliar na avaliação dos resultados.

## **6.1 Etapas Futuras**

Após a conclusão da eficiência do método aplicado juntamente com a avaliação estatística, é possível projetar futuros estudos envolvendo novas etapas e condições, buscando obter uma ampliação de novos resultados estatísticos.

Além de estudar novas interações entre variáveis, também pode ser avaliado uma ampliação do sistema inicialmente estudado em pequena escala.

## REFERÊNCIAS

ALVES, A. C. M. **Avaliação do tratamento de efluentes líquidos contendo cobre e chumbo por adsorção em carvão ativado**. 2007. 69 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

AQUINO, S. F.; SILVA, S. Q.; CHERNICHARO, C. A. Considerações práticas sobre o teste de demanda química de oxigênio (DQO) aplicado a análise de efluentes anaeróbios. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 295-304, dez. 2006. FapUNIFESP (SciELO). Acesso em: 12 jun. 2023.

ARAÚJO, F. V. F.; YOKOYAMA, L.; TEIXEIRA, L. A. C. Remoção de cor em soluções de corantes reativos por oxidação com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV. **Química Nova**, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 11-14, fev. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422006000100003>. Acesso em: 12 jun. 2023.

ATERRO sanitário do município de Votorantim. [Mountain View]: Google, 2018. 1 imagem de satélite, color., 3D. Google Câmera: 1530 m, Lat. 23°37'33''N47°27'56''E. Disponível em: <https://earth.google.com/web/@-23.62523345,-47.46602293,837.24860854a,692.88399565d,30y,0h,0t,0r/data=MikKJwolCiExNnp2WHNjYWR5MEFkd1JxN293eTVLYWIGQmJnZHNBTkYgAToDCgEw>. Acesso em: 14 jan. 2024.

BRITO, N. N.; PATERNIANI, J. E. S.; BROTA, G. A.; PELEGRINI, R. T. **Avaliação da Redução da Poluição do Chorume Tratado por Processo Fotoquímico**. AUGMDOMUS, [S. l.], v. 3, p. 20–30, 2011. Disponível em: <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/99>. Acesso em: 11 março. 2022.

BRITO, N. N.; SILVA, V. B. M. Processos oxidativos avançados e sua aplicação ambiental. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, n.3. v.1, p. 36-47, 2012.

CARDOSO, V. C. **Estudo do Processo de Coagulação/Floculação por meio da Moringa oleifera Lam para Obtenção de Água Potável**. 2007. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, 2007.

CAVANCANTI, J. E. W. A. **Manual de Tratamento de Efluentes Industriais**. 3 ed. Brasil: J.E.CAVALCANTI, 2016.

COLZATO, M. Fundamentos ICP OES. Disponível em: <https://cmaa.esalq.usp.br/fundamentos-icp-oes/>. Acesso em: 05 maio 2022.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed., v. 1. São Carlos: Rima. 2005.

DIAS, L. M. M. **Produção de zeólita a partir de cinza volante de carvão mineral para adsorção de metais em chorume gerado no lixão/aterro controlado na região amazônica**. 2022. 141 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Recursos Naturais, Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022. Disponível em: [http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/13952/1/Tese\\_ProducaoZeolitaCinza.pdf?m\\_sckid=205a9554d0ab11eca6d171b23199dd1b](http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/13952/1/Tese_ProducaoZeolitaCinza.pdf?m_sckid=205a9554d0ab11eca6d171b23199dd1b). Acesso em: 28 abr. 2022.

FABRETI, A. A. **Pós-tratamento de efluente de lagoa de estabilização através de processo físico- químico**. 2006. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FIALHO, F. L. **Caracterização das qualidades adsorptivas de saibro amigdalóide: adsorção de chumbo**. 2020. 67 f. Tese (Doutorado) - Curso de Avaliação de Impactos Ambientais, Universidade La Salle, Canoas, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unilasalle.edu.br/bitstream/11690/1591/1/flfialho.pdf>. Acesso em: 03 maio 2022.

FRANCHI, J. G.; **A Utilização de Turfa Como Adsorvente de Metais Pesados**. 2004. 198p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

GOMES, L.P., 2009. Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras. PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. **Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: ABES. 2009.

HEUMANN, W.L. **Industrial air pollution control systems**. McGraw- Hill, 620 p, 1997.

IBGE (org.). **Votorantim**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/votorantim.html>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LESSA, A. C. V. **Caracterização do chorume do centro de gerenciamento de resíduos de Sergipe**. 2017. 38 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnólogo em Saneamento Ambiental, Instituto Federal de Sergipe, Aracaju, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ifs.edu.br/biblioteca/handle/123456789/616?msckid=d33cafe5d0a911ecac0cf5136cc2f8c1>. Acesso em: 22 abr. 2022.

LO, I.M.C., Chacaracteristics and treatment of leachates from domestic landfills. **Enviromental International**. V.22 n.4 p. 433-442, 1996.

MENEGHINI, A. L. B. **Simulação numérica e ensaios experimentais da remoção de fenol em coluna de leito fixo utilizando carvão ativado como adsorvente**. 2017. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2017.

MORAIS, J. L.; SIRTORI, C.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Tratamento de chorume de aterro sanitário por fotocatalise heterogênea integrada a processo biológico convencional. **Química Nova**, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 20-23, fev. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422006000100005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/rpNttvGdpM754qTCPVhCnsz/?lang=pt>. Acesso em: 22 abr. 2022.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O.; HANSEN, M. A. F. Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica. **Revista Brasileira de Geociências**, [S.L.], v. 41, n. 3, p. 549-557, 1 set. 2011. Sociedade Brasileira de Geologia. <http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.2011413549557>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjgeo/a/VwKWB8PjwyWJRyqT8Hw4qFR/?msckid=f35f7cf7d0a811ecb5024ca67fdcb3cd>. Acesso em: 22 abr. 2022.

MUCELIN, C. A.; BELLINI, M. E IMPACTOS AMBIENTAIS PERCEPTÍVEIS NO ECOSSISTEMA URBANO. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 20, n. 1, p. 111-124, jun. 2022.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10267/1/2014\\_liv\\_rfdnascimento.pdf?msckid=2aba607bd0c711ec8dbbba06e2ec1f43](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10267/1/2014_liv_rfdnascimento.pdf?msckid=2aba607bd0c711ec8dbbba06e2ec1f43). Acesso em: 01 maio 2022.

NOLL, K.E.; GOUNARIS, V.; HOU, W. Adsorption technology for air and water pollution control. Chelsea: **Lewis Publishers Inc.**, 347p, 1992.

OLIVEIRA, S. ; PASQUAL, A. (2004). Avaliação de Parâmetros indicadores de poluição por efluente líquido de um aterro sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.9, n.3, p. 240-249.

PACHECO, J. R. **Estudo de certas potencialidades de processos oxidativos avançado para o tratamento de percolado de aterro sanitário**. 2004. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

PAZ, E. C. **Análise da eficiência de remoção de ferro e manganês de águas de abastecimento por filtração adsortiva**. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/93949>. Acesso em: 01 maio 2022.

PEREIRA, L.C. **A Utilização do Reativo de Fenton na Desinfecção de Esgotos Domésticos com Fins de Reuso na Irrigação de Culturas**. 2006. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

PEREIRA, R. J. **Sequência didática para o ensino de ondas eletromagnéticas no 9º ano do ensino fundamental por meio de uma situação problema**. 2016. 32 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

POLEZI, M. **Aplicação de processo oxidativo avançado (h<sub>2</sub>o<sub>2</sub>/uv) no efluente de uma ete para fins de reuso**. 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

REIS, C. E. A. L. **Processo de oxidação avançada: reação de fenton no tratamento de efluentes industriais**. 2018. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/38809/1/2018\\_tcc\\_cealreis.pdf?msckid=5929cfd0d0aa11ecb3457a0662f8cc81](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/38809/1/2018_tcc_cealreis.pdf?msckid=5929cfd0d0aa11ecb3457a0662f8cc81). Acesso em: 28 abr. 2022.

ROCHA, E. E. M. **Precipitação química associada aos processos de tratamento de lixiviados**. 2013. 139 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

ROCHA, E. M. R., **Desempenho de um sistema de lagoas de estabilização na redução da carga orgânica do percolado gerado no aterro da Muribeca –PE**. 2005. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

RODRIGUES, C. C. **Contribuição ao estudo do tratamento do gás amoníaco por adsorção em leito fixo de carvão ativado**. 2002, 134p, Tese (Doutorado) - PPG-EQ/DEQ/UFSCar, São Carlos (SP), 2002.

RODRIGUEZ, R.; FLESLER, F.; LEHMANN, V. Oxidación Avanzada – Sistema Fenton – em Tratamiento de Efluentes Industriales de Alta Carga Organica. INTI, 2013.

ROUSSEAU, R. W. Handbook of separation process technology. **New York: John Wiley & Sons**, 1010 p., 1987.

SANTOS, F. A. **Uso das escamas da pinha da Araucaria angustifolia para biosorção de metais pesados em efluente industrial de galvanoplastia**. 2007, Tese (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007.

SCHIMIDT, L. T. *et al.* 2003. Efeito de Doses de N de Chorume e Épocas de Coleta no Desenvolvimento do Capim da Tanzânia. **Revista Ciência Agronômica**. Vol 34, nº 1.

SCINOCCA, M. Pessoas e urubus disputam lixo no aterro de Votorantim. Disponível em: <https://www.jornalcruzeiro.com.br/sorocaba/pessoas-e-urubus-disputam-lixo-no-aterro-de-votorantim/?msckid=829e1b29c4f411ecb692e2249c455657>. Acesso em: 03 maio 2022.

SEEWALD, M. M. **Avaliação da remoção de cor e desinfecção de lixiviados de aterro sanitário utilizando ozônio e peróxido de hidrogênio**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos, São Leopoldo, 2013.

SILVA, J.G.M.; LIMA, G.F.C.; PAZ, L.G. **Degradabilidade in situ da matéria seca de cactáceas nativas, silagem de sorgo e concentrado**. In: reunião anual da sociedade brasileira de zootecnia, Viçosa, MG. Anais. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2000. p.65.

SILVA, S. B.; LUVIELMO, M. M.; GEYER, M. C.; PRÁ, I. Potencialidades do uso do ozônio no processamento de alimentos. **Semina: Ciências Agrárias**, [S.L.], v. 32, n. 2, p. 659-682, 12 jun. 2023. Universidade Estadual de Londrina. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32n2p659>. Acesso em: 03 maio 2022.

SOUSA, M. C.; ANJOS, D.A.; SALES, E. M.; ANDRADE, M. R. Processos de tratamento do chorume e reaproveitamento: Uma revisão. p. 655-664 . In: **Anais do V Encontro Regional de Química & IV Encontro Nacional de Química [Blucher Chemistry Proceedings]**. São Paulo: Blucher, 2015. Acesso em: ISSN 2318-4043, DOI 10.5151/chenpro-5erq-am6.

SOUZA, B. M. **Avaliação de Processos Oxidativos Avançados Acoplados com Carvão Ativado Granulado com Biofilme para Reuso De Efluentes e Refinaria de Petróleo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

TAMBANI, P. C. **Estudo da degradação do fenol e seus intermediários pelo processo UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**. 2011. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

TAVARES, B. F. D. **Tratamento de chorume: análise dos efluentes da evaporação forçada**. 2011. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

TIZAOUI, C.; BOUSELMI, L.; MANSOURI, L.; GHRABI, A.; Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide systems. **Journal of Harzardous materials**, n 140, p. 316-324, 2007.

VACLAVIK, F. D. **Avaliação e otimização do uso de zeólitas no tratamento terciário de efluentes líquidos industriais**. 2010. 71 f. TCC (Doutorado) - Curso de Química Industrial, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/28611>. Acesso em: 01 maio 2022.

VALENTE, J. P. S.; PADILHA, P. M.; SILVA, A. M. M. Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu - SP. **Ecletica Quimica**, [S.L.], v.

22, n. 1, p. 49-66, 8 dez. 1997. *Ecletica Quimica*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.26850/1678-4618eqj.v22.1.1997.p49-66>. Acesso em: 01 maio 2023.

VAZ, L. G. L.; **Performance do processo de coagulação/floculação no tratamento do efluente líquido gerado na galvanoplastia**. 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2009.

VIGNOLA, F.; **Aplicação de processos adsorptivos para a remoção de contaminantes de efluentes petroquímicos sintéticos**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/95130?show=full>. Acesso em: 01 maio 2022.

VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização**. 2. ed. Minas Gerais: UFMG 2002.

WANG, F.; EL-DIN, M. Gamal; SMITH, D. W. Oxidation of aged raw landfill leachate with O<sub>3</sub> only and O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> treatment efficiency and molecular size distribution analysis. **Ozone: Science And Engineering**, v. 26, p.287-298, 2004.

WISSMANN, M. A.; KONRAHT, J. M.; SCHAFER, J.; CUNHA, E. C. O futuro do lixo: um estudo sobre a geração de lixo e os gastos ambientais na região sul do brasil. Enfoque: **Reflexão Contábil**, [S.L.], v. 33, n. 3, p. 67-82, set. 2014. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/enfoque.v33i3.20721>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/273348747\\_O\\_futuro\\_do\\_lixo\\_um\\_estudo\\_sobre\\_a\\_geracao\\_de\\_lixo\\_e\\_os\\_gastos\\_ambientais\\_na\\_Regiao\\_Sul\\_do\\_Brasil?msclkid=569ac4c3d0a811ec89d1df3a0a379ab6](https://www.researchgate.net/publication/273348747_O_futuro_do_lixo_um_estudo_sobre_a_geracao_de_lixo_e_os_gastos_ambientais_na_Regiao_Sul_do_Brasil?msclkid=569ac4c3d0a811ec89d1df3a0a379ab6). Acesso em: 19 abr. 2022.

WU, J. J.; WU, C. C.; MA, H. W.; CHANG, C. C. Treatment of landfill leachate by ozone-based advanced oxidation processes. **Chemosphere**, 54, pag. 997–1003, 2004.