

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

WILLIAM MULLER MEYER

**Estudo da degradação do chorume por integração de processos  
eletrolíticos, físico-químicos e oxidativos avançados**

Lorena – SP

2019

WILLIAM MULLER MEYER

**Estudo da degradação do chorume por integração de processos  
eletrolíticos, físico-químicos e oxidativos avançados**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola  
de Engenharia de Lorena da Universidade de São  
Paulo, como exigência parcial para obtenção do título  
de engenheiro químico.

Orientador: Prof. Dr. Lucrécio Fábio dos Santos

Lorena – SP

2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado  
da Escola de Engenharia de Lorena,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Meyer, William Muller

Estudo da degradação do chorume por integração de processos eletrolíticos, físico-químicos e oxidativos avançados / William Muller Meyer; orientador Lucrécio Fábio dos Santos. - Lorena, 2019.  
58 p.

Monografia apresentada como requisito parcial para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia Química - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2019

1. Tratamento. 2. Chorume. 3. Integração de processos. I. Título. II. Santos, Lucrécio Fábio dos, orient.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Silvana e Ricardo, por serem essas pessoas incríveis que são, por todo apoio, incentivo e confiança depositados em mim durante esse tempo.

A toda minha família, que sempre me apoiou e ajudou a lapidar minhas qualidades e sempre acreditar no meu potencial.

A minha namorada, Leticia, por toda compreensão, suporte e apoio, me dando forças para conseguir alcançar meus objetivos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Lucrécio Fábio dos Santos, por ter acreditado no meu potencial. Agradeço por, mesmo diante dos obstáculos, ter se mostrado uma pessoa completamente compreensiva e respeitosa. Agradeço por toda a paciência e atenção.

Aos professores, Prof. Dr. Robson Rocha e Prof<sup>a</sup>. Dra. Daniela Helena Pelegrine Guimarães, pela disponibilidade para participação da banca avaliadora, toda paciência e respeito.

A todos os professores, que por todos conhecimentos e experiências passadas durante toda a minha trajetória educacional.

A empresa Aratu Ambiental LTDA, por todo apoio prestado antes e durante a execução desse trabalho.

Aos meus amigos de infância, amigos da república *penguin*, amigos da ch e pb e a todos que de alguma forma, direta ou indireta, fizeram parte da minha formação como pessoa e profissional.

## RESUMO

MEYER, W. M. **Estudo da degradação do chorume por integração de processos eletrolíticos, físico-químicos e oxidativos avançados**. 2020. 58 fls. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Química, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2020.

Um dos maiores problemas enfrentados pela sociedade nos dias atuais é a questão da geração de lixo e sua disposição. A maneira mais recomendada para disposição do lixo é sua destinação para aterros sanitários. Porém, ao chegar nestes, o lixo sofre decomposição, que aliada a diversos processos físico-químicos e fatores ambientais gera líquidos e gases poluentes. A fração líquida gerada recebe o nome de chorume e possui grande variedade de poluentes, apresentando riscos ambientais. Deve-se atentar, portanto, a correta recuperação, tratamento e descarte deste efluente. Este trabalho visou estudar formas de tratamento do chorume, empregando processos eletrolíticos, físico-químicos e oxidativos avançados. Os processos foram estudados individualmente e de maneira integrada. Para a avaliação dos resultados foram analisados os parâmetros: cor, pH, condutividade, DQO e concentração de fenóis. Inicialmente, a amostra de chorume *in natura* foi caracterizada com: pH = 7,22; Temperatura = 25,5 °C; Condutividade = 5,85 mS/cm; Fenóis totais = 3,8 mg/L; DQO = 5.929 mg/L. Os melhores resultados para redução de DQO (80,53%) e Fenol (89,48%) foram obtidos na integração ABC, entre os processos eletrolítico, físico-químico e oxidativo. Ao líquido resultante desse processo foi realizada uma etapa de pós-tratamento (refinamento), na qual foi submetido a filtração com passagem por filtro de argila expandida e carvão ativado. Após a etapa de refinamento, a fração tratada foi caracterizada com: pH = 6,24; Temperatura = 24,3 °C; Condutividade = 4,12 mS/cm; Fenóis totais = 0,4 mg/L; DQO = 892 mg/L. Esses valores correspondem aos padrões impostos pela Resolução nº 357 da CONAMA para o reuso como água doce de classe 4.

Palavras-chave: Tratamento. Chorume. Integração de processos.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema geral de um processo eletrolítico.....	14
Figura 2 – pHmetro HI98128 utilizado para a caracterização do pH das amostras.....	24
Figura 3 – Condutivímetro HI8633 utilizado para a caracterização da condutividade nas amostras .....	25
Figura 4 – Conjunto reator HI839800/Fotômetro HI83124 utilizado para a realização das análises de DQO .....	25
Figura 5 – Kit para teste de fenol HI3864 utilizado para a realização das análises de fenol .....	27
Figura 6 – Reator eletrolítico de bancada utilizado nos experimentos eletrolíticos (A).....	28
Figura 7 – Equipamento de <i>Jar Test</i> (Teste de jarro) utilizado na realização dos experimentos físico-químicos (B) .....	29
Figura 8 - Gerador de ozônio com vazão de 10L/min utilizado nos experimentos de ozonização (C) .....	31
Figura 9 - Filtro de argila expandida e carvão ativado utilizado no processo de pós-tratamento proposto .....	32
Figura 10 - Esquema da composição interna do filtro contendo argila expandida e carvão ativado utilizado no processo de pós-tratamento proposto .....	32
Figura 11 - Amostra de chorume <i>in natura</i> utilizada nos experimentos .....	33
Figura 12 - Processo eletrolítico (A) durante execução de um dos experimentos A30.....	34
Figura 13 - Amostras após tratamento eletrolítico (A) .....	35
Figura 14 - Redução de DQO e Fenol por tempo de processo no tratamento eletrolítico (A) .....	36
Figura 15 - Amostras após tratamento físico-químico (B) (superior) .....	38
Figura 16 - Amostras após tratamento físico-químico (B) (frontal).....	38
Figura 17 - Amostras após tratamento oxidativo (C) .....	41
Figura 18 - Gráfico de redução de DQO e Fenol por tempo de processo no tratamento oxidativo (C).....	43
Figura 19 - Amostra após tratamento integrado AB.....	44
Figura 20 - Efluente após tratamento integrado BC .....	46
Figura 21 - Amostra após tratamento integrado ABC .....	48
Figura 22 - Amostra após tratamento integrado ABC e filtração em leito de argila expandida e carvão ativado .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros e níveis adotados para a realização dos experimentos físico-químicos (B) .....	29
Tabela 2 - Matriz de planejamento para a realização dos experimentos físico-químicos (B) .....	30
Tabela 3 - Caracterização da amostra de chorume <i>in natura</i> utilizada nos experimentos...	33
Tabela 4 - Redução de DQO obtida no tratamento eletrolítico (A) .....	35
Tabela 5 - Redução de fenol obtida no tratamento eletrolítico (A) .....	36
Tabela 6 - Redução de DQO obtida no tratamento físico-químico (B) .....	39
Tabela 7 - Redução de fenol obtida no tratamento físico-químico (B) .....	40
Tabela 8 - Redução de DQO obtida no tratamento (C) .....	42
Tabela 9 - Redução de fenol obtida no tratamento C .....	42
Tabela 10 - Redução de DQO obtida no tratamento integrado AB .....	44
Tabela 11 - Redução de fenol obtida no tratamento integrado AB .....	45
Tabela 12 - Redução de DQO obtida no tratamento integrado BC .....	46
Tabela 13 - Redução de fenol obtida no tratamento integrado BC .....	47
Tabela 14 - Redução de DQO obtida no tratamento integrado ABC .....	48
Tabela 15 - Redução de fenol obtida no tratamento integrado ABC .....	49
Tabela 16 - Caracterização do chorume ao final do processo de tratamento integrado ABC e filtração em leito de argila expandida e carvão ativado.....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Principais fatores responsáveis pela variação do chorume.....	12
---	----

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	9
1.1 Objetivo geral	10
1.2 Objetivos específicos	10
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	11
2.1 O descarte de lixo no brasil	11
2.2 Aterros sanitários	12
2.3 Tratamento de chorume	13
2.3.1 Tratamento eletrolítico	13
2.3.2 Tratamento Físico-Químico	16
2.3.3 Processos Oxidativos	19
2.3.4 Processo de filtração	20
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	23
3.1 Obtenção das amostras de Chorume	23
3.2 Análise dos parâmetros	23
3.2.1 pH	24
3.2.2 Condutividade	24
3.2.3 Demanda Química de Oxigênio (DQO)	25
3.2.4 Concentração de Fenóis	26
3.3 Processo Eletrolítico	27
3.4 Processo físico-químico	28
3.5 Processos Oxidativos	30
3.6 Processo de Filtração	31
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	33
4.1. Caracterização da Amostra	33
4.2. Tratamento Eletrolítico (A)	34



4.3. Tratamento Físico-Químico (B).....	37
4.4. Tratamento Oxidativo (C).....	41
4.5. Tratamento integrado: eletrolítico e físico-químico (AB) .....	43
4.6. Tratamento integrado: físico-químico e oxidativo (BC).....	45
4.7. Tratamento integrado: eletrolítico, físico-químico e oxidativo (ABC) .....	47
4.8. Pós-tratamento: Filtração em leito de argila expandida e carvão ativado .....	49
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>57</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Impulsionado pelo crescimento populacional e consumismo, a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. Dados do Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil, de 2017, da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) apontam uma geração de 214.868 toneladas de RSU diários no Brasil.

No ano de 2010, o Brasil adotou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PRNS), que previa acabar com os lixões. Porém, o panorama de 2017 da ABRELPE, indica que cerca de 40,9% dos resíduos gerados ainda são despejados em locais inapropriados e apenas 59,1% são dispostos em aterros sanitários.

Assim que os resíduos são dispostos nos aterros, eles sofrem diversos processos físicos, químicos e biológicos que são responsáveis pela geração de líquidos e gases. A fração líquida recebe vários nomes na literatura, entre eles: lixiviado, percolado ou chorume e é fruto da decomposição do lixo, aliado a fatores ambientais como: índice de chuvas, clima da região e composição dos resíduos, idade do aterro (PACHECO; PERALTA-ZAMORA, 2006).

O descarte indevido do chorume pode ser responsável por grande impacto ambiental, principalmente em relação à poluição das águas. A percolação do líquido pelo aterro pode chegar a atingir lençóis freáticos, ocasionando poluição de águas subterrâneas e superficiais e causando grandes danos ao ecossistema local (MORAIS, 2005).

Nesse cenário, percebe-se a importância de submeter o chorume a um tratamento devidamente eficaz antes de seu descarte na natureza.

### 1.1 Objetivo geral

Investigar a degradação do chorume utilizando integração de processos eletrolíticos, físico-químicos e oxidativos avançados.

Para tanto, foram propostos os seguintes objetivos específicos.

### 1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o chorume nos parâmetros de cor, pH, condutividade, DQO e concentração de fenóis;
- Estudar individualmente a efetividade dos métodos de tratamento: eletrolítico, físico-químico e oxidativo;
- Analisar a eficácia da integração dos processos;
- Propor uma técnica de refinamento do tratamento que possibilite a adequação do tratamento ao reuso.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 O descarte de lixo no brasil**

Os avanços no desenvolvimento econômico, tecnológico e populacional propiciam um consumismo crescente, com aumento na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) como: plásticos, papéis, lixos orgânicos, metais, resíduos do serviço de saúde e resíduos industriais. Porém, o problema não é só a geração dos resíduos, mas também o descarte e tratamento deles (VILELA-RIBEIRO et al., 2009)

Esses resíduos podem ser responsáveis por impactos relacionados à saúde pública e meio ambiente, se mal gerenciados. Os RSU podem, por exemplo, ser responsáveis por contaminar solos e águas subterrâneas, emitir poluentes tóxicos e até facilitar a disseminação de insetos responsáveis pela transmissão de doenças (COSTA; ALFAIA; CAMPOS, 2019).

Atualmente, as formas mais utilizadas para disposição desses resíduos no Brasil são: lixões, aterros controlados e aterros sanitários. Dentre elas, destaca-se o aterro sanitário como sendo a forma de disposição utilizada quando se deseja obter um maior controle dos impactos ambientais, já que seu projeto prevê impermeabilização do solo, recobrimento de resíduos, drenagem de águas pluviais e drenagem dos efluentes (BRITO, 2014).

Tendo em vista a redução dos impactos socioambientais, em 2010 o senado brasileiro sancionou a Lei nº12.305/10, conhecida como Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS). Um dos decretos dessa lei previa a substituição dos lixões pelos aterros sanitários até o ano de 2014. Porém, devido a fatores econômicos, dentre outros, o prazo foi adiado para 2021.

Esse adiamento reflete nos dados do panorama da ABRELPE de 2018, que indica que, até o ano em questão, cerca de 40,9% dos resíduos gerados ainda eram despejados em locais inapropriados e apenas 59,1% eram dispostos em aterros sanitários (ABRELPE, 2018).

## 2.2 Aterros sanitários

Os aterros sanitários se mostram como uma opção correta e segura para a disposição final dos RSU. Projetados de forma a minimizar os danos à saúde pública e ao meio ambiente, contam com uma eficaz impermeabilização do solo. São preenchidos por camadas de resíduos intercaladas por camadas de solo, para evitar a formação excessiva de lixiviados e sua infiltração, assim como reduzir as emissões de biogás para a atmosfera (LOPES, 2011; COSTA et al., 2018).

Entretanto, fatores externos, como a chuva, fazem com que a formação do chorume seja praticamente inevitável. Assim, os aterros devem conter um sistema de coleta e um plano de tratamento para o chorume produzido (IPT/CEMPRE, 2018).

Ao chegarem aos aterros, os RSU são depositados nas células, onde são expostos a processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem naturalmente. Esses processos são os responsáveis pela geração de subprodutos líquidos (chorume) e gasosos (biogás) (GOMES et al., 2018).

A geração do chorume é altamente variável durante a vida ativa de um aterro. É possível apontar diversos fatores que interferem nas características e na quantidade do chorume produzido, conforme mostra o Quadro 1.

Quadro 1- Principais fatores responsáveis pela variação do chorume

<b>Fatores climatológicos:</b>	Regime de chuvas, temperatura ambiente e umidade.
<b>Fatores relativos ao resíduo depositado:</b>	Composição, quantidade, densidade e teor de umidade inicial.
<b>Fatores relativos ao tipo de deposição:</b>	Idade do aterro, características de permeabilidade, declividade e altura entre camadas, métodos de impermeabilização e compactação empregados

Fonte: Adaptado de IPT/CEMPRE, 2018; BOCCHILIERI, 2010.

Atenção especial deve ser dada ao tratamento do chorume, já que sua geração e escoamento, sem que receba o tratamento e disposição adequados, são os problemas ambientais e de saúde pública mais relevantes, associados ao lixo no Brasil (IPT/CEMPRE, 2018).

## 2.3 Tratamento de chorume

O chorume oriundo de aterros sanitários é um efluente com alto potencial de poluição, por conter altas concentrações de substâncias orgânicas e inorgânicas e uma complexa e variável composição. Por essa razão o chorume deve ser submetido a algum tipo de tratamento para minimizar seus efeitos ao ser lançado a corpos d'água ou encaminhado para redes coletoras de esgoto (COSTA; ALFAIA; CAMPOS, 2019; IPT/CEMPRE, 2018).

Por conta da alta complexidade e variabilidade do chorume, existem diversas tecnologias aplicáveis a seu tratamento, entre elas, é possível citar: tratamento eletrolítico, biológico, físico-químico e processos oxidativos, filtrações, refluxo de chorume pelo aterro (SILVA, 2009; IPT/CEMPRE, 2018).

Rocha (2014) afirma que uma das etapas mais complexas do tratamento de chorume é justamente a definição das tecnologias adequadas a serem utilizadas. Isso se dá principalmente pois as tecnologias indicadas para o tratamento apresentam suas vantagens e desvantagens, dessa forma, a escolha da técnica deve levar em conta as características do chorume a ser tratado e as determinações legais que deve-se cumprir (ABBAS et al., 2009).

### 2.3.1 Tratamento eletrolítico

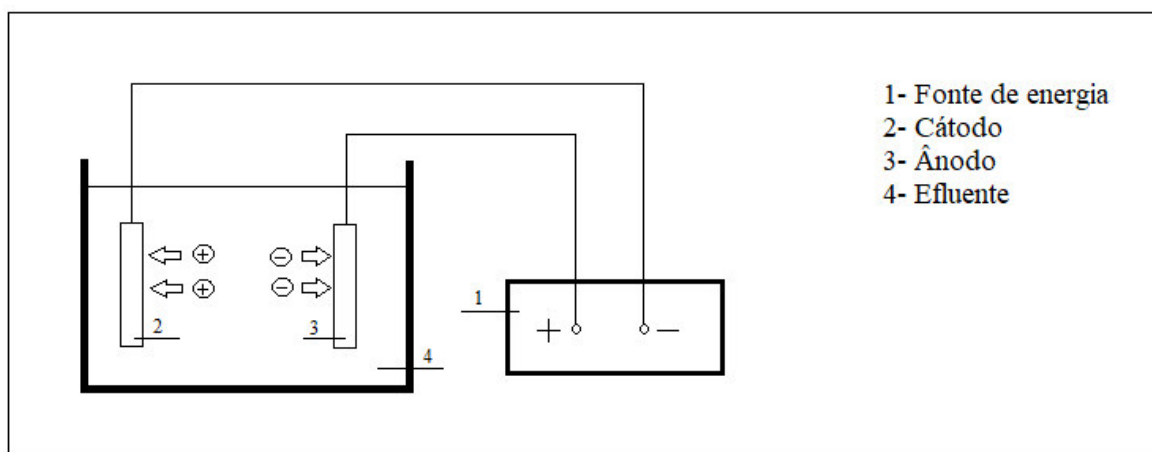
Nos últimos anos, a evolução das técnicas de eletrólise permitiu que esse método de tratamento se tornasse mais viável economicamente. Por se tratar de um método eficaz, versátil, de fácil operação e aparelhagem simples, o processo de eletrólise apresenta-se como uma alternativa interessante para o tratamento de diversos tipos de efluentes (ILHAN et al., 2008). Cerqueira, Marques e Russo (2011) citam diversas possibilidades de aplicações do sistema eletrolítico para tratamento de efluentes, entre elas destacam-se: esgotos sanitários, efluentes de restaurantes, indústrias têxteis, de processamento de coco, curtumes e siderurgias.

O tratamento eletrolítico de efluentes é o processo no qual o líquido a ser tratado sofre ação de uma corrente elétrica para a geração de coagulantes. Essa corrente pode ser gerada por uma fonte convencional e é aplicada por meio de eletrodos. Os coagulantes gerados têm como principal função interagir com as moléculas do efluente de maneira a formar flocos passíveis de sofrer decantação ou floculação (LABANOWSKI; PALLIER;

FEUILLADE-CATHALIFAUD, 2010; CERQUEIRA; MARQUES; RUSSO, 2011; DIA et al., 2018).

A Figura 1 apresenta um esquema que mostra a simplicidade da aparelhagem necessária para a realização do processo eletrolítico. Nela é possível notar a necessidade de uma fonte de energia, eletrodos (cátodo e ânodo) e o meio (no caso, o próprio efluente). No cátodo ocorre a redução eletrolítica, facilitando a remoção de metais pesados pela repulsão de elétrons. O ânodo é o responsável pela oxidação de outros poluentes, por exemplo: compostos orgânicos (DENG; ENGLEHARDT, 2007).

Figura 1 - Esquema geral de um processo eletrolítico



Fonte: Adaptado de (DENG; ENGLEHARDT, 2007).

Apesar da simplicidade do equipamento, a eficiência do processo depende do controle e adequação de certos parâmetros operacionais. Os estudos de Mandal, Dubey e Gupta (2017) apontaram como principais fatores a serem observados no processo eletrolítico são: material de fabricação do ânodo, densidade de corrente, pH e condutividade elétrica. Otenio et al. (2008) constataram que a eficácia da eletrólise tem uma estreita relação com a condutividade elétrica do efluente.

Ilhan et al. (2008) compararam a diferença da eficácia de remoção de DQO e compostos amoniacais de chorume utilizando anodos de ferro e alumínio. Segundo eles, para condições semelhantes e testes de trinta minutos, a utilização do anodo de alumínio se mostrou mais eficaz, apresentando redução de 56% de DQO e 14% de compostos amoniacais, enquanto o ânodo de ferro apresentou redução de apenas 35% de DQO e 11% de compostos amoniacais. Os estudos apontaram ainda que a utilização de anodos de ferro gerou um acúmulo de íons  $\text{Fe}^{2+}$  em solução, prejudicando o resultado final do tratamento.

Aliado a esses fatores, o baixo custo dos eletrodos de alumínio em relação aos de ferro torna a sua utilização mais atrativa do ponto de vista econômico. Por conta disso, os anodos de alumínio são os mais utilizados na aplicação industrial da técnica.

Densidade de corrente é a medida da corrente elétrica por unidade de área de eletrodo. Segundo Mandal, Dubey e Gupta (2017), essa grandeza é o principal parâmetro experimental a ser avaliado no tratamento eletrolítico.

Ilhan et al. (2008) também estudaram a influência da variação da densidade de corrente na remoção de DQO de chorume. Seus estudos focaram na variação de 348 para 631 A/m<sup>2</sup>, apresentando um crescimento da redução de DQO de 45,5% para 59,1% após trinta minutos de teste. Porém, estes pesquisadores relataram também que a densidade de corrente tem relação direta com o custo do processo, ou seja, o custo dobra ao passar de 348 para 631 A/m<sup>2</sup>.

Mohajeri et al. (2018) analisaram a eficiência do tratamento eletrolítico de chorume variando a densidade de corrente de 20 a 80 mA/cm<sup>2</sup>. Seus estudos apontam que as reduções de DQO e coloração aumentaram de 22% para 45% e 38% para 60%, respectivamente, conforme a densidade de corrente foi aumentada.

O pH é um parâmetro que diverge opiniões quando se trata de processo eletrolítico de tratamento de efluentes. Na literatura, existem vários resultados positivos de variação na remoção de coloração e DQO ao se variar o pH do efluente. Mohajeri et al. (2018) constataram um aumento de aproximadamente 25% de remoção de DQO e 15% de remoção da coloração do chorume ao elevar o pH de 4 para 8.

Porém, essa remoção manteve-se praticamente constante para valores de pH de 8 até 12. Dessa forma, concluíram que os melhores resultados foram obtidos em pH neutro ou levemente básico. Entretanto, existem outros estudos que constatarem que o pH não exerce influência alguma sobre o processo. Chiangi, Changi e Wen (1995), por exemplo, estudaram o tratamento de chorume de um aterro do sul do Taiwan. Ao variar o pH entre 4 e 10 não observaram nenhuma alteração no processo. Mandal, Dubey e Gupta (2017) concluíram em seus estudos que essas divergências estão relacionadas às variações de composições de chorume.

Segundo Ilhan et al. (2008), espera-se que o pH do efluente aumente durante o processo eletrolítico. Os autores constataram que após 30 minutos de experimento,



utilizando eletrodo de alumínio e utilizando densidade de corrente de 348 A/m<sup>2</sup> o pH passou de 8,3 para 8,9.

A condutividade elétrica tem uma grande importância no processo eletrolítico, pois quanto maior, menos energia o sistema demanda, ocasionando numa redução expressiva de custos. Geralmente, o chorume já possui uma condutividade elétrica alta. Porém, a condutividade pode ser aumentada, melhorando o processo, pela simples adição de cloreto de sódio à solução (MANDAL; DUBEY; GUPTA, 2017).

Mohajeri et al. (2018) comprovaram esse aumento na eficiência ao adicionar de 500 a 3000 mg/L de NaCl ao chorume do aterro sanitário Pulau Burung, situado na Malásia. Essa adição refletiu numa elevação de 25 para 45% da remoção de DQO e de 49 para 60% de remoção de coloração.

Nesse cenário, Mandal, Dubey e Gupta (2017) foram capazes de concluir que o tratamento eletrolítico de efluentes permite alta eficácia na redução de DQO, coloração e amoniacais.

### 2.3.2 Tratamento Físico-Químico

O tratamento físico-químico atua principalmente com base nos processos de coagulação e floculação para proporcionar um pré-tratamento ou redução de sólidos e impurezas presentes no efluente. É um processo frequentemente utilizado para o tratamento de efluentes industriais e chorume devido a sua ampla faixa de aplicação e baixo custo operacional (MELLO et al., 2012; PEDROSO; DIAS, 2012).

O princípio que rege o tratamento é a transformação de pequenas partículas em grandes agregados, que a seguir, serão submetidos à sedimentação. A primeira fase do processo é a etapa na qual um ou mais coagulantes são adicionados à solução para desestabilizar as partículas coloidais e formar flocos. Esses flocos são aumentados devido à ação dos coagulantes e floculantes e das colisões entre as partículas (MELLO et al., 2012; PEDROSO; DIAS, 2012).

Tatsi et al. (2003) reportam a importância dos processos de coagulação e floculação alegando que são processos essenciais para o tratamento de efluentes industriais. Ghafari et al. (2009) constataram ainda que a técnica pode também ser aplicada com sucesso para o tratamento de chorume de aterro.

Esse tipo de tratamento também pode ser utilizado como uma das etapas de um processo integrado de tratamento, geralmente como pré-tratamento (antecipando uma etapa de osmose reversa ou tratamento biológico) ou como etapa de polimento final, para remoção da matéria orgânica não degradada (SIL; KUMAR, 2016)

Para Schiopu e Gavrilesu (2010), o tratamento físico-químico é relativamente simples e deve preferencialmente ser aplicado para o tratamento de chorume de aterros mais antigos. Estes autores reportam ainda que o processo pode obter aproveitamento na faixa de 20-85% para redução de: DQO, coloração, turbidez e remoção de metais pesados. O aproveitamento depende não só do chorume a ser tratado, mas também dos coagulantes a serem utilizados, que podem variar entre: coagulantes tradicionais e novos polímeros inorgânicos (baseados em ferro e magnésio, sais de alumínio e policloreto de alumínio).

Os principais coagulantes encontrados na literatura para tratamento de chorume são geralmente sais de metais (sulfato de alumínio, sulfato de ferro, cloreto férrico), polímeros inorgânicos (baseados em ferro e magnésio, policloreto de alumínio) ou polímeros orgânicos (TANFLOC SG).

#### 2.3.2.1 Policloreto de alumínio (PAC)

As vantagens do uso do PAC estão relacionadas à alta eficiência de remoção de impurezas e material orgânico, menor influência no pH e menor produção de lodo (ZAMRI; AZIZ; YUSOFF, 2018). Essas vantagens são apontadas pelos estudos de Ghafari et al. (2009) como principais responsáveis pelo crescimento do uso de PAC como coagulante no tratamento de água e efluentes na Europa, Japão e América do Norte. Tatsi et al. (2003) observaram que com adição de 3g/L de coagulantes a base de alumínio, a eficácia de redução de DQO em chorumes de aterros novos foi de 38%.

Aziz et al. (2007) estudaram a influência da variação do pH para a utilização de coagulante a base de sulfato de alumínio. Obtiveram como resultados, em pH 4 e a utilizando 2200 mg/L, uma redução de cor de 82%, enquanto que em pH 6 utilizou-se 5000 mg/L para reduzir a cor em 80% e a pH 12 fez-se necessário 1200 mg/L para reduzir 77% a cor.

Para Zamri, Aziz e Yusoff (2018), o uso de 1000 mg de PAC por litro de chorume apresentou melhores resultados na faixa de pH 6-9, removendo a turbidez em 90%, sólidos solúveis em 88,8% e coloração em 98,9%.

#### 2.3.2.2 Tanfloc SG

O Tanfloc SG é um polímero orgânico capaz de atuar na neutralização de cargas e formação de flocos. Por conta dessas características, sua principal aplicação é na utilização como coagulante/floculante (sozinho ou assistido) em sistemas de tratamento de efluentes industriais e chorume (TANAC, 1999).

Esse polímero vem recebendo atenção especial de diversos estudos científicos nas últimas décadas por se tratar de um polímero de base natural, biodegradável e que não altera o pH do meio (TREVISAN, 2014).

O uso de tanino como coagulante no processo de tratamento de chorume foi apontado como eficaz na remoção de poluentes (orgânicos e inorgânicos) para Konradt-Moraes et al (2007).

Pedroso e Dias (2012) estudaram a utilização de Tanfloc SG como coagulante no processo de tratamento de chorume do aterro de Maringá - PR e obtiveram reduções significantes de cor e turbidez: 48,7% e 64%, respectivamente.

Campos et al. (2013) compararam a utilização de diversos coagulantes para o tratamento do chorume do aterro Morro do Céu (Niterói - RJ). Para estes pesquisadores, o Tanfloc SG foi o coagulante mais eficiente testado no trabalho, com o qual se obteve as melhores remoções de DQO.

#### 2.3.3.3 Polímeros Sintéticos

A utilização de polímeros sintéticos como agentes coagulantes e floculantes apresenta inúmeras vantagens, entre elas, destaca-se o crescimento do tamanho de floco, que torna a separação de fases (aquosa e sólida) mais rápida. Ainda, o volume de lodo produzido é menor em comparação com outros coagulantes (RUI; DAUD; LATIF, 2012; BOLTO, 1995).

Além disso, a performance dos polímeros sintéticos na coagulação é, geralmente, melhor que a dos coagulantes tradicionais, se consideradas as mesmas dosagens e pH (SUN et al., 2011)

Esses benefícios fazem com que os polímeros sintéticos sejam largamente utilizados no tratamento de efluentes por meio dos processos de coagulação e floculação (BOLTO, 1995).

Os polímeros sintéticos podem ser classificados de acordo com a carga iônica presente, assim sendo: aniônicos, catiônicos e não-iônicos (ABIOLA, 2018).

Rui, Daud e Latif (2012) avaliaram a eficiência do coagulante PAC aliado ao uso de polímeros aniônico e catiônico. Nesse estudo, constataram que o uso do polímero aniônico apresentou flocos maiores e mais compactos, gerando assim menor quantidade de lodo, enquanto o polímero catiônico gerou lodo mais volumoso e de aspecto gelatinoso.

Quando usados como floculantes, os polímeros apresentam notável efeito na redução de DQO, turbidez e coloração. Irfan et al. (2017) avaliaram a efetividade do uso dos polímeros em colaboração aos coagulantes tradicionais. Não só isso, o estudo apresentou ainda as melhores faixas de aplicação dos polímeros aniônicos e catiônicos: pH ácido, próximos de 2.

Os polímeros podem ainda ser utilizados como aditivos para outros floculantes, Rui, Daud e Latif (2012) estudaram a combinação entre PAC e polímeros sintéticos na remoção de DQO, sólidos solúveis e redução de coloração. Seus resultados apontaram o PAC como sendo efetivo no tratamento de chorume e os polímeros (aniônico e catiônico) se provaram eficientes como aditivos para o processo de coagulação.

Campos et al. (2013) analisaram a utilização de TANFLOC juntamente com polímero catiônico no tratamento de chorume. A combinação do estudo obteve reduções de DQO de no mínimo 30%, se mostrando efetiva.

### 2.3.3 Processos Oxidativos

A remoção de cianetos, fenóis e outros compostos orgânicos do chorume é geralmente realizada por reações de oxirredução. Esse processo geralmente é promovido por agentes oxidantes, como o ozônio, peróxido de hidrogênio, cloro e gás oxigênio (IPT/CEMPRE, 2018).

A ozonização é um processo que vem recebendo muita atenção da literatura por conta do alto potencial oxidativo do  $O_3$ , sendo uma tecnologia já muito utilizada no tratamento de água, efluentes industriais e chorume (LOVATO et al., 2019).

O tratamento com ozônio traz como vantagens o, já citado, alto potencial de oxidação, elevação da concentração de oxigênio dissolvido e alta eficiência de integração com outros processos (FERREIRA, 2015).

Porém, a principal diferença da utilização de processos oxidativos no tratamento de chorume ao invés de processos físico-químicos é que nos físico-químicos ocorre a transferência de fase do poluente, enquanto nos oxidativos ocorre a degradação, seja ela total ou parcial, da matéria orgânica. O objetivo final de um processo oxidativo avançado é a conversão da matéria orgânica em subprodutos com menor toxicidade ou, se possível, gás carbônico, água e íons (ROCHA, 2014).

Além disso, o tratamento utilizando ozônio tem a capacidade de eliminar diversos compostos orgânicos do chorume, degradando hidrocarbonetos clorados e aromáticos, fenóis e pesticidas, mostrando-se assim, uma técnica muito efetiva no processo de descontaminação ambiental (SOUZA, 2006; QUEIROZ et al., 2011; BATISTA et al., 2016; POBLETE et al., 2019). O poder oxidante do ozônio pode ser amplificado ao se utilizar combinações com peróxido de hidrogênio, radiação ultravioleta e outros catalisadores (WANG et al., 2017; POBLETE et al., 2019).

Porém, uma das desvantagens do uso do ozônio é o elevado custo de implantação e utilização (por ser um composto instável, deve ser produzido no local de aplicação), alta reatividade e baixa seletividade (FERREIRA, 2015). Essas características implicam em complicações econômicas que dificultam a disseminação do processo.

#### 2.3.4 Processo de filtração

Uma técnica geralmente utilizada como pré ou pós-tratamento de chorume é a filtração em colunas de argila expandida e carvão ativado. Essa técnica consiste na passagem do chorume por um leito filtrante de modo a reter partículas indesejáveis (IPT/CEMPRE, 2018).

A utilização de materiais como a argila é recomendada para a diminuição da concentração de sólidos suspensos no efluente (IPT/CEMPRE, 2018). Porém, Nayanthika et al. (2018) apontam que apenas alguns compostos poluentes específicos são retidos em colunas de argila.

O carvão ativado tem a capacidade de adsorver uma quantidade maior de compostos poluidores do efluente. Devido a sua alta eficiência na remoção de compostos orgânicos e nitrogênio amoniacal, o tratamento de chorume com carvão ativado apresenta grande sucesso (COSTA; ALFAIA; CAMPOS, 2019)

A capacidade adsortiva do carvão ativado depende de fatores como: características do adsorvente (material, forma, volume, distribuição de poros, superfície, ativação do material e teor de cinzas), do adsorvato (que varia de acordo com o efluente a ser tratado) e condições de processo, como pH, tempo de contato e temperatura (KAWAHIGASHI et al., 2014).

Junior, Dalsasso e Rohers (2010) avaliaram a utilização de filtração direta e passagem de chorume por colunas de carvão ativado como pré-tratamento. Seus experimentos apresentaram ótimos desempenhos para redução de metais pesados e amônia no chorume.

Kawahigashi et al. (2014) utilizaram o carvão ativado como etapa de pós tratamento para chorume. Estes autores obtiveram de 94 a 100% de remoção na coloração e 45 a 76% de remoção de DQO. Esses resultados mostram que o carvão ativado pode ser utilizado com prioridade nessa etapa do tratamento.

### 2.3.5 Tratamento por Integração de Processos

Após o estudo das principais técnicas utilizadas no tratamento de chorume nos dias atuais, nota-se a necessidade da investigação da integração desses processos para obter um produto final passível de reuso. Na literatura são encontrados estudos que visam integrar alguns desses processos.

Pacheco e Peralta-Zamora (2006) comentam que por conta da elevada e variada carga poluente do chorume, não existe tecnologia nenhuma que isoladamente consiga tratar de maneira adequada esse efluente. É nesse cenário que Kawahigashi et al. (2014) apontam que é a associação de processos de tratamento complementares é recomendada para o chorume.

A integração de processos oxidativos avançados com processos biológicos foi estudada por Moraes (2005). O trabalho aponta que essa integração foi a melhor estratégia utilizada no tratamento do chorume estudado.

Dia et al. (2018) analisaram o tratamento de chorume utilizando o processo eletrolítico seguido de processos biológicos, conseguindo eficiência de remoção de compostos amoniacais de cerca de 99%. Os autores concluem o estudo afirmando que a união de técnicas é fundamental e muito promissora.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve natureza aplicada de pesquisa, utilizou abordagem quali-quantitativa, com objetivos descritivos e metodologia experimental. Os experimentos foram realizados no laboratório de análises químicas da empresa ARATU AMBIENTAL LTDA situado no município de Taubaté/SP.

Este trabalho realizou o tratamento do chorume oriundo de aterro sanitário por processo eletrolítico, físico-químico, oxidativos avançados e integração destes processos, visando obter a máxima redução possível de contaminante.

Foram avaliados individualmente os seguintes processos: (A) Eletrolítico, (B) Físico-químico e (C) Processos Oxidativos (ozonização). Então, foi realizada a integração dos processos: AB; BC; ABC.

Ao melhor resultado encontrado foi implementada uma etapa de pós-tratamento por meio de filtração em leito de argila expandida e carvão ativado, de forma a enquadrar o efluente nos padrões para reuso.

#### 3.1 Obtenção das amostras de Chorume

As amostras de chorume utilizadas no estudo foram doadas pela empresa ARATU AMBIENTAL LTDA.

#### 3.2 Análise dos parâmetros

Dentre os parâmetros analisados neste trabalho citam-se cor, pH, condutividade, DQO e concentração de fenóis.

As análises foram realizadas conforme os métodos para análise de água e efluentes estabelecidos pela APHA (2005).



### 3.2.1 pH

O pH das amostras foi analisado utilizando o pHmetro da marca Hanna Instruments e de modelo HI98128 (Figura 2).

Figura 2 – pHmetro HI98128 utilizado para a caracterização do pH das amostras



Fonte: Arquivo pessoal.

### 3.2.2 Condutividade

A condutividade foi medida utilizando um condutivímetro da marca Hanna Instruments e de modelo HI8633 (Figura 3). As medições foram realizadas na escala de mS/cm.

Figura 3 – Condutivímetro HI8633 utilizado para a caracterização da condutividade nas amostras



Fonte: Arquivo pessoal.

### 3.2.3 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

As análises de DQO foram realizadas utilizando o conjunto reator/fotômetro da marca Hanna Instruments de modelo HI839800 (reator) e HI83214 (fotômetro) (Figura 4).

Figura 4 – Conjunto reator HI839800/Fotômetro HI83124 utilizado para a realização das análises de DQO



Fonte: Arquivo pessoal.

O método tem como base o aquecimento a amostra por 2 horas a uma temperatura de 150 °C com um agente oxidante (dicromato de potássio). Então, os compostos orgânicos oxidáveis reduzem o íon dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ), laranja, para o íon crômico ( $\text{Cr}^{3+}$ ), de coloração esverdeada.

Após o tempo de reação, a amostra é submetida ao fotômetro, onde a quantidade de  $\text{Cr}^{3+}$  é determinada baseada na lei de Beer-Lambert, descrita pela Equação 1:

$$-\log \frac{I}{I_0} = \varepsilon_{\lambda} \cdot c \cdot d \text{ ou } A = \varepsilon_{\lambda} \cdot c \cdot d \quad (\text{Equação 1})$$

Na qual,

$$-\log \frac{I}{I_0} = A = \text{Absorvância};$$

$I_0$  = Intensidade do raio de luz incidente;

$I$  = Intensidade do raio de luz após absorção;

$\varepsilon_{\lambda}$  = Absortividade molar da substância para um comprimento de onda  $\lambda$

$c$  = Concentração molar da substância;

$d$  = Caminho ótico.

O resultado em mg/L de DQO é definido como mg de  $\text{O}_2$  consumido por litro da amostra.

O reagente utilizado também contém sulfato de prata, que atua como catalisador e sulfato de mercúrio (II), utilizado para controlar possíveis interferências causadas por íons cloreto.

### 3.2.4 Concentração de Fenóis

As análises indicativas da concentração de fenóis foram realizadas utilizando o kit para teste de fenol, da marca Hanna Instruments e modelo HI3864 (Figura 5).

Figura 5 – Kit para teste de fenol HI3864 utilizado para a realização das análises de fenol



Fonte: Arquivo pessoal.

Neste procedimento, os compostos fenólicos reagem de modo a formar uma coloração amarelo-laranja com a 4-amino antipirina em solução alcalina tamponada a pH 10. A absorbância do produto dessa reação é proporcional a concentração de fenóis presentes na amostra.

### 3.3 Processo Eletrolítico (A)

O processo eletrolítico experimental foi realizado utilizando o reator de bancada da Figura 6. Ele é composto por um tanque de polipropileno e capacidade de 6 litros. Dentro dele é disposto um conjunto de placas de alumínio conectadas a uma fonte externa. O conjunto de placas é feito de maneira que se intercalem placas com corrente positiva e negativa.

Figura 6 – Reator eletrolítico de bancada utilizado nos experimentos eletrolíticos (A)



Fonte: Arquivo pessoal.

Depois da montagem do reator e realizadas as conexões com a fonte externa, as placas foram cobertas com o chorume. A fonte foi, então, ligada.

Para avaliar a eficácia do tratamento eletrolítico, foi proposta a realização de três testes nos quais foram mantidas fixas a corrente e a tensão do sistema. Dessa forma, a variável analisada foi o tempo de processo.

O estudo de Mohajeri et al. (2018), apontou a faixa entre 20 e 80 mA/cm como sendo a mais eficaz para o tratamento eletrolítico, nesse trabalho foi escolhido o valor médio de 40mA/cm para realização dos experimentos. Portanto, as placas de alumínio, com área total de anodo de 0,35 m<sup>2</sup>, foram submetidas a corrente de 14 A e tensão de 1,33 V durante todo o processo.

Ilhan et al. (2008) apontaram grandes alterações na redução de DQO para a faixa de tempo entre 5 e 30 minutos de experimento, por conta disso, neste trabalho as amostras foram submetidas a testes de: 5 minutos, 15 minutos e 30 minutos. Para facilitar a identificação, os testes foram nomeados de A5, A15 e A30, respectivamente.

### 3.4 Processo físico-químico (B)

Para o processo físico-químico foi utilizado o equipamento de *Jar Test* (teste de jarro), conforme modelo apresentado na Figura 7. Sua função é garantir condições semelhantes de agitação para todas as amostras.

Figura 7 – Equipamento de *Jar Test* (Teste de jarro) utilizado na realização dos experimentos físico-químicos (B)



Fonte: Arquivo pessoal.

As amostras foram dispostas nas provas do aparelho *Jar Test* e a elas foram adicionados os coagulantes: Policloreto de alumínio (PAC), Tanfloc SG, polímero aniônico.

Nesta etapa foram avaliadas as quantidades utilizadas de cada coagulante e a variável resposta foi a porcentagem de redução de DQO. Portanto, fatores como agitação e velocidade de rotação foram mantidos constantes ao longo dos experimentos. Cada teste foi realizado com 500 mL do efluente bruto.

Os parâmetros e seus níveis estão indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros e níveis adotados para a realização dos experimentos físico-químicos (B)

Reagentes	Nível baixo (-)	Nível médio (0)	Nível alto (+)
<b>PAC</b>	0,6 mL	0,8 mL	1,0 mL
<b>TANFLOC SG</b>	0,6 mL	0,8 mL	1,0 mL
<b>Polímero Aniônico</b>	3,5 mL	5 mL	6,5 mL

Fonte: Arquivo pessoal

A Tabela 2 apresenta a matriz de planejamento dos experimentos. O procedimento foi realizado em triplicata no ponto central.

Tabela 2 - Matriz de planejamento para a realização dos experimentos físico-químicos (B)

<b>Experimento</b>	<b>PAC</b>	<b>TANFLOC SG</b>	<b>Polímero Aniônico</b>
<b>1</b>	-	-	-
<b>2</b>	+	-	-
<b>3</b>	-	+	-
<b>4</b>	+	+	-
<b>5</b>	-	-	+
<b>6</b>	+	-	+
<b>7</b>	-	+	+
<b>8</b>	+	+	+
<b>9</b>	0	0	0
<b>10</b>	0	0	0
<b>11</b>	0	0	0

Fonte: Arquivo pessoal

A adição dos reagentes seguiu a ordem: 1º PAC, 2º TANFLOC SG e 3º Polímero Aniônico. Entre as adições, manteve-se o sistema em agitação numa rotação de 50 rpm.

### 3.5 Processos Oxidativos

Neste processo foi estudada a aplicação de ozônio às amostras de chorume. O oxidante foi adicionado usando um gerador de ozônio (Figura 8).

Figura 8 - Gerador de ozônio com vazão de 10L/min utilizado nos experimentos de ozonização (C)



Fonte: Arquivo pessoal.

O gerador injetou o ozônio produzido em um béquer contendo a amostra numa vazão de 10 L/min. A variável estudada foi o tempo de processo.

Lovato et al (2019) concluíram que o processo de ozonização tem maior eficiência no intervalo de 0-15 minutos. Então, com a finalidade de verificar a influência do tempo de processo nesse intervalo, no presente trabalho as amostras foram submetidas a testes de: 5 minutos, 10 minutos e 15 minutos. Para facilitar a identificação, os testes foram nomeados de C5, C10 e C15, respectivamente

### 3.6 Processo de Filtração

Este processo foi realizado como uma etapa de refinamento e foi aplicada somente ao melhor tratamento obtido na integração dos outros processos.

Nesta etapa, a fração líquida tratada passou por um filtro contendo argila expandida e carvão ativado (Figura 9 e Figura 10) para garantir a remoção de contaminantes que possam ter resistido aos outros processos.

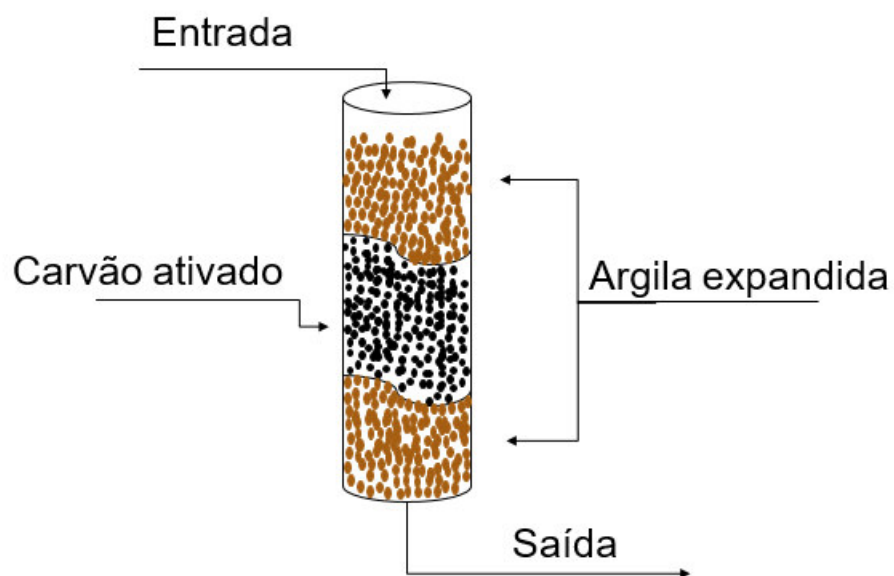


Figura 9 - Filtro de argila expandida e carvão ativado utilizado no processo de pós-tratamento proposto



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 10 - Esquema da composição interna do filtro contendo argila expandida e carvão ativado utilizado no processo de pós-tratamento proposto



Fonte: Arquivo pessoal.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Caracterização da Amostra

A amostra foi coletada no tanque de chorume da Aratu Ambiental LTDA e foi caracterizada como mistura de chorumes *in natura*. Ela foi submetida a ensaios de pH, temperatura, condutividade, fenóis e DQO. Os resultados dos testes de caracterização são apresentados na Tabela 3.

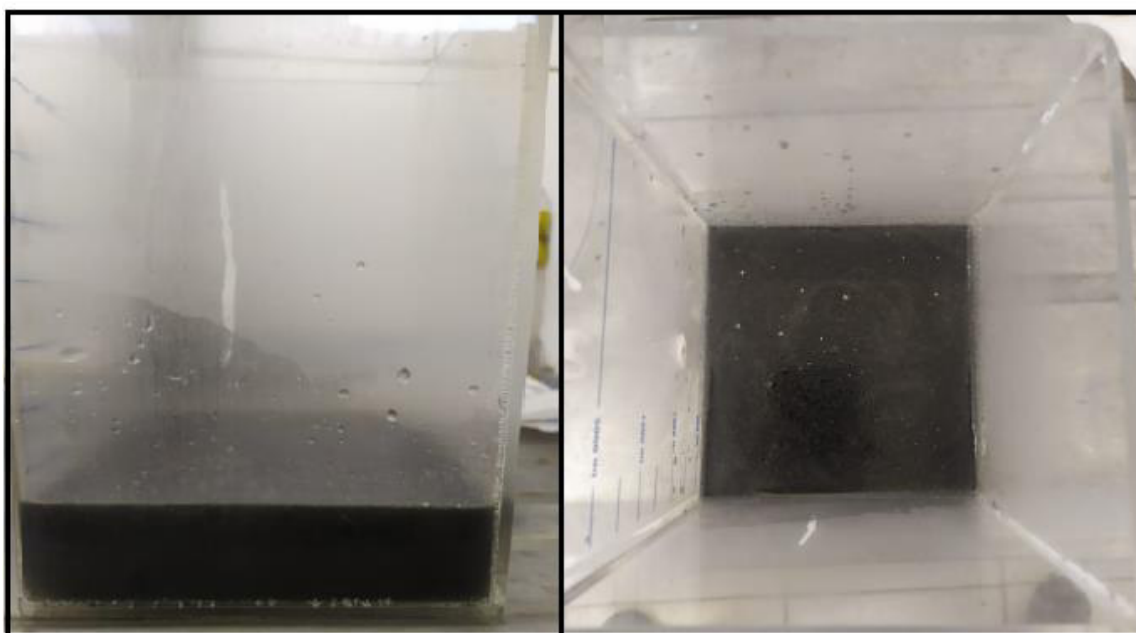
Tabela 3 - Caracterização da amostra de chorume *in natura* utilizada nos experimentos

Parâmetros	Resultados
<b>pH</b>	7,22
<b>Temperatura</b>	25,5 °C
<b>Condutividade</b>	5,85 mS/cm
<b>Fenóis</b>	3,8 mg/L
<b>DQO</b>	5.929 mg/L

Fonte: Arquivo pessoal.

A cor do chorume *in natura* pode ser observada na Figura 11.

Figura 11 - Amostra de chorume *in natura* utilizada nos experimentos



Fonte: Arquivo pessoal.

#### 4.2. Tratamento Eletrolítico (A)

Amostras foram coletadas após os experimentos e submetidas ao ensaio de DQO. Considerando que os parâmetros pH, temperatura e condutividade foram pouco alterados, a avaliação da efetividade do processo foi realizada de acordo com a redução de DQO e Fenol em comparação com a amostra bruta.

A Figura 12 apresenta o processo, onde é possível perceber a formação de material flotado, uma das justificativas para a diminuição dos valores de DQO e Fenol.

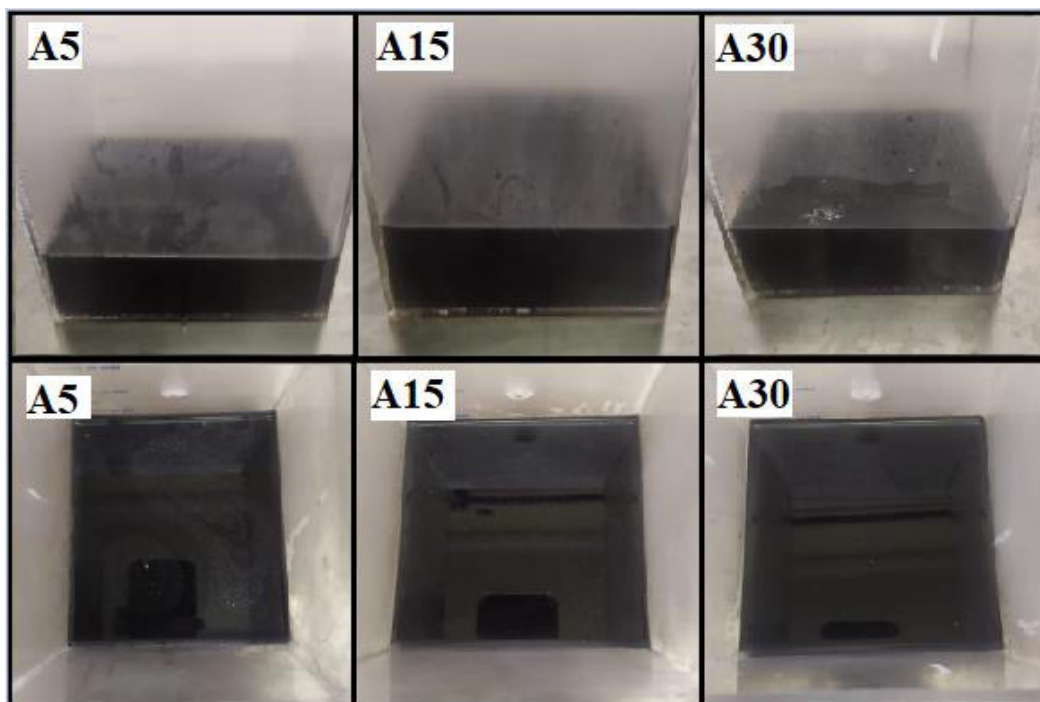
Figura 12 - Processo eletrolítico (A) durante execução de um dos experimentos A30



Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 13 mostra a diferença de coloração entre as amostras retiradas dos testes A5, A15 e A30. Visualmente, foi possível perceber que não houve alteração significativa de cor ao longo do tempo de processo.

Figura 13 - Amostras após tratamento eletrolítico (A)



Fonte: Arquivo pessoal

Após o tempo de cada experimento, a fração líquida foi extraída do sistema por meio de filtração simples e alíquotas do sobrenadante foram submetidas a ensaios de DQO e Fenol. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 4 e 5 na forma de porcentagem de redução de DQO e Fenol, respectivamente.

Tabela 4 - Redução de DQO obtida no tratamento eletrolítico (A)

Experimentos	DQO final (mg/L)	Redução de DQO (%)	Média	Desvio Padrão
A15	5.141	13,3	12,8	1,28
A25	5.278	11,0		
A35	5.100	14,0		
A115	4.611	22,2	21,2	0,78
A215	4.679	21,1		
A315	4.723	20,4		
A130	4.380	26,1	25,9	1,00
A230	4.471	24,6		
A330	4.327	27,0		

Fonte: Arquivo pessoal.

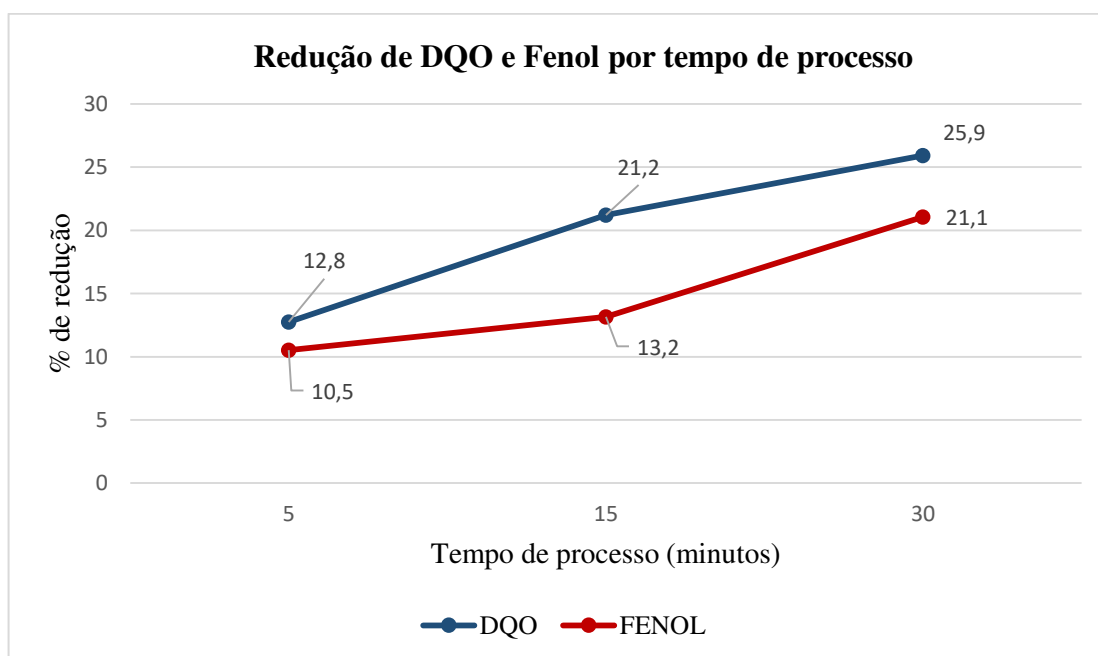
Tabela 5 - Redução de fenol obtida no tratamento eletrolítico (A)

Parâmetros	Fenol final (mg/L)	Redução de fenol (%)	Média	Desvio Padrão
A <sub>15</sub>	3,4	10,5	10,5	0
A <sub>25</sub>	3,4	10,5		
A <sub>35</sub>	3,4	10,5		
A <sub>115</sub>	3,3	13,2	13,2	0
A <sub>215</sub>	3,3	13,2		
A <sub>315</sub>	3,3	13,2		
A <sub>130</sub>	3,0	21,1	21,1	0
A <sub>230</sub>	3,0	21,1		
A <sub>330</sub>	3,0	21,1		

Fonte: Arquivo pessoal.

Apesar da pouca redução de cor, os valores de DQO e Fenol mostram que as maiores reduções foram obtidas com tempos de 30 minutos, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 - Redução de DQO e Fenol por tempo de processo no tratamento eletrolítico (A)



Fonte: Arquivo pessoal

Os experimentos mantidos por cinco minutos (A<sub>x5</sub>) apresentaram as menores reduções médias de DQO e Fenol: 12,8% e 10,5%, respectivamente. Por sua vez, os testes conduzidos por quinze minutos (A<sub>x15</sub>) apresentaram valores intermediários de remoção:

21,2% e 13,2%, respectivamente. Os melhores resultados foram obtidos nos testes submetidos a trinta minutos de reação, que apresentaram média de redução de DQO de 25,9% e de Fenol de 21,1%. Dessa forma, o tempo se apresentou como uma variável importante e decisiva para o processo de tratamento eletrolítico.

Porém, o tratamento eletrolítico não apresentou grande redução de DQO individualmente, isso pode ser explicado pelo fato de a condutividade do efluente não ser alta (5,85 mS/cm). Essa justificativa é reforçada pelo estudo de Mohajeri et al. (2018), que comprova um aumento de 25 para 45% na remoção de DQO ao elevar a condutividade do chorume a ser tratado.

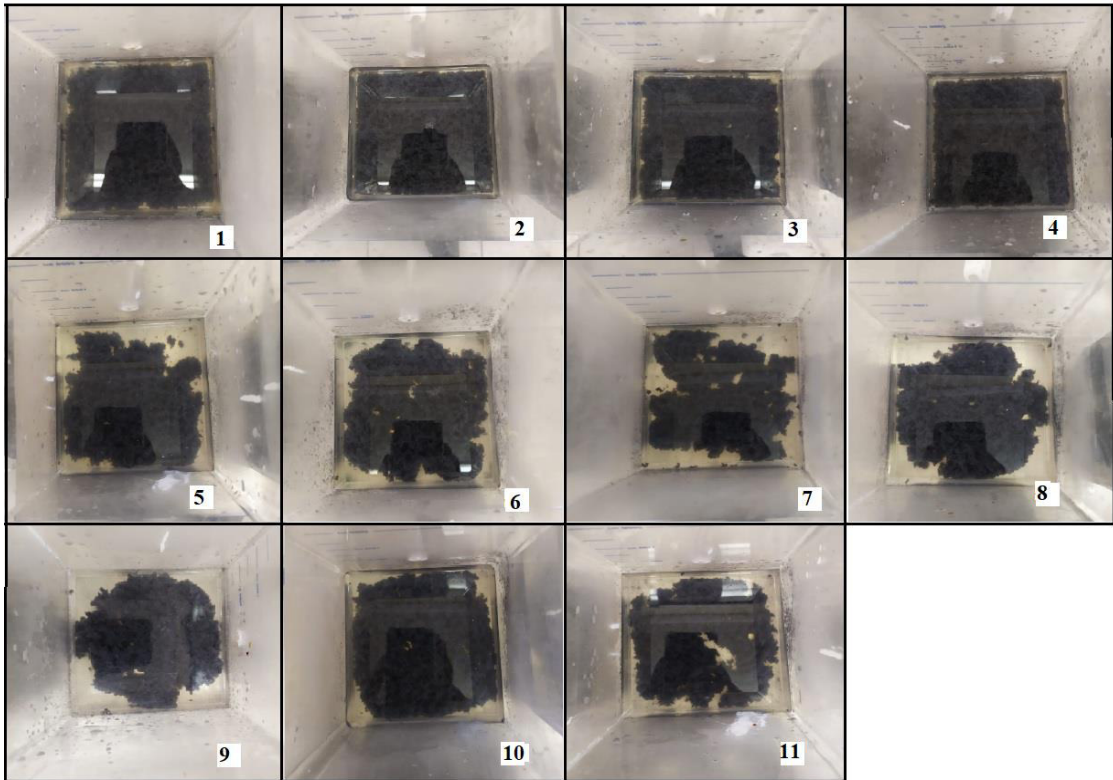
Individualmente, o tratamento eletrolítico se mostrou menos eficaz para o efluente estudado na maioria parâmetros propostos neste estudo, já que apresentou baixa redução de DQO e as piores reduções de fenol e cor entre todos os métodos analisados neste trabalho.

Por se mostrar mais eficaz, o tempo de reação de trinta minutos foi utilizado nos testes de integração dos processos AB e ABC.

#### 4.3. Tratamento Físico-Químico (B)

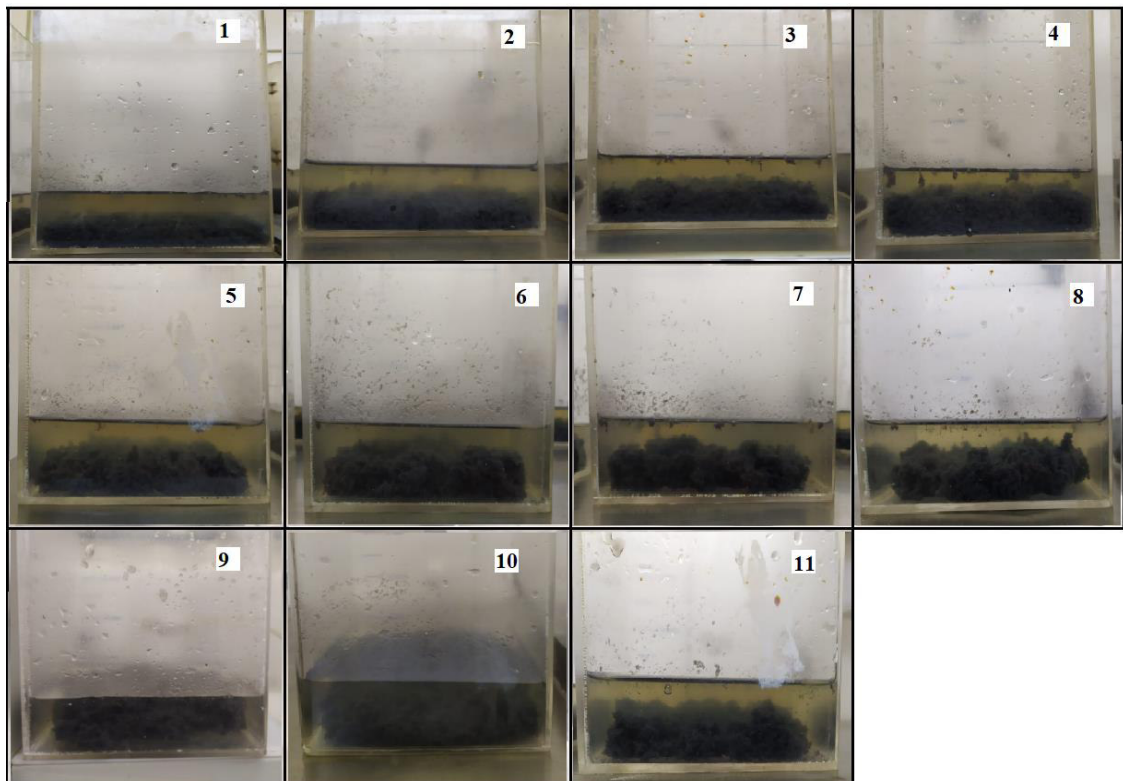
A Figura 15 e a Figura 16 permitem a visualização do lodo formado nos frascos do *Jar Test*, da coloração e turbidez do chorume tratado.

Figura 15 - Amostras após tratamento físico-químico (B) (superior)



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 16 - Amostras após tratamento físico-químico (B) (frontal)



Fonte: Arquivo pessoal

Foi possível constatar que nos experimentos com nível baixo de Polímero Aniônico (1, 2, 3 e 4) há formação de flocos menores e mais dispersos, enquanto nos níveis altos (5, 6, 7 e 8) observa-se um agrupamento mais consistente dos flocos. Essa característica é muito importante já que flocos maiores proporcionam uma separação de fases (sólida e líquida) mais fácil e eficiente.

Essa informação é corroborada pelo estudo de Rui, Daud e Latif (2012), que observou a formação de flocos maiores e mais compactados ao utilizar polímero aniônico e PAC.

Além disso, é possível notar que a cor da fração líquida nos experimentos com maior uso de PAC (2, 4, 6 e 8) foi muito eficiente. Levando em conta que o pH da amostra foi lido em 7,22, essa remoção na coloração vem ao encontro dos estudos de Zamri, Aziz e Yusoff (2018), que conseguiram remoção de 98,8% de cor ao utilizar PAC em chorume com faixa de pH entre 6 e 9 e apontaram como sendo a faixa ideal para o uso desse coagulante.

Após decantação, a fração líquida foi extraída do sistema por meio de filtração simples e alíquotas do sobrenadante foram submetidas a ensaios de DQO e Fenol. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 6 e 7 na forma de porcentagem de redução de DQO e Fenol, respectivamente.

Tabela 6 - Redução de DQO obtida no tratamento físico-químico (B)

<b>Experimento</b>	<b>PAC</b>	<b>TANFLOC SG</b>	<b>Polímero Aniônico</b>	<b>DQO Final (mg/L)</b>	<b>Redução de DQO (%)</b>
<b>1</b>	-	-	-	2.508	57,7
<b>2</b>	+	-	-	1.891	68,1
<b>3</b>	-	+	-	2.271	61,7
<b>4</b>	+	+	-	2.496	57,9
<b>5</b>	-	-	+	2.348	60,4
<b>6</b>	+	-	+	1.879	68,3
<b>7</b>	-	+	+	2.336	60,6
<b>8</b>	+	+	+	2.324	60,8
<b>9</b>	0	0	0	2.229	62,4
<b>10</b>	0	0	0	2.206	62,8
<b>11</b>	0	0	0	2.235	62,3

Fonte: Arquivo pessoal



Tabela 7 - Redução de fenol obtida no tratamento físico-químico (B)

<b>Experimento</b>	<b>PAC</b>	<b>TANFLOC SG</b>	<b>Polímero Aniônico</b>	<b>Fenol final (mg/L)</b>	<b>Redução de fenol (%)</b>
<b>1</b>	-	-	-	2,2	42,1
<b>2</b>	+	-	-	1,8	52,6
<b>3</b>	-	+	-	2,0	47,4
<b>4</b>	+	+	-	2,1	44,7
<b>5</b>	-	-	+	2,0	47,4
<b>6</b>	+	-	+	1,8	52,6
<b>7</b>	-	+	+	2,0	47,4
<b>8</b>	+	+	+	2,0	47,4
<b>9</b>	0	0	0	2,0	47,4
<b>10</b>	0	0	0	2,0	47,4
<b>11</b>	0	0	0	2,0	47,4

Fonte: Arquivo pessoal

Os melhores resultados foram encontrados para o experimento 6, com redução de DQO de 68,3% e redução de Fenol de 52,6%. O segundo melhor foi o experimento 2, com reduções de DQO e Fenol de 68,1% e 52,6%, respectivamente. Esses resultados já apontam maior eficiência no uso de PAC e menor no uso de TANFLOC SG, já que ambos testes foram realizados com nível alto do primeiro e baixo do segundo.

O experimento 4 apresentou os piores resultados, com 57,9% de redução de DQO e 44,74% de redução de Fenol, e corrobora com a conclusão de que o TANFLOC SG não foi tão eficiente para o tratamento do efluente proposto, já que nele foi utilizado nível alto do coagulante natural.

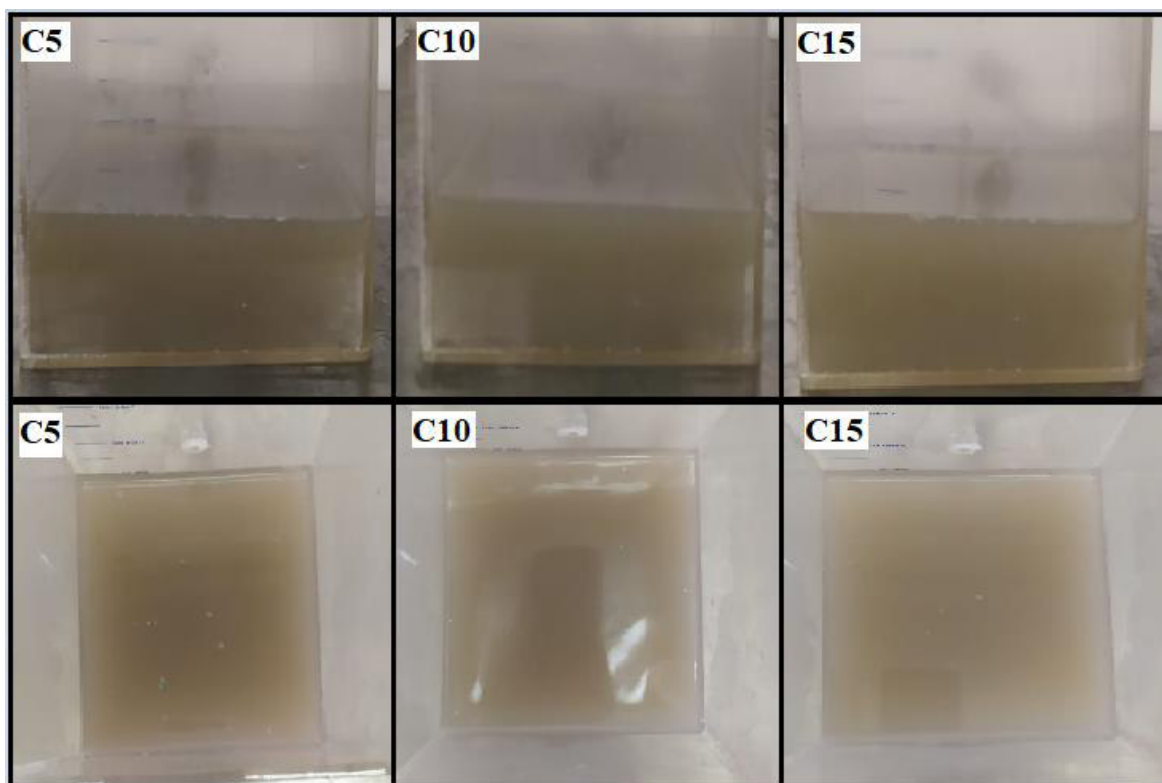
O tratamento físico-químico apresentou excelentes resultados do ponto de vista de redução de DQO, mas não foi o mais adequado para a remoção de fenol. Foi possível constatar grande remoção de cor, porém o tratamento individual não foi capaz de remover toda a turbidez da amostra.

Pelo fato do experimento 6 apresentar o melhor resultado individualmente, os parâmetros utilizados nele foram reproduzidos nos testes de integração AB, BC e ABC.

#### 4.4. Tratamento Oxidativo (C)

A Figura 17 apresenta o efluente ao final do processo de tratamento oxidativo.

Figura 17 - Amostras após tratamento oxidativo (C)



Fonte: Arquivo pessoal

É possível notar uma redução significativa na coloração em relação ao efluente *in natura* desde o teste conduzido por cinco minutos (C5). Porém, essa redução evolui ao longo do tempo de processo e, portanto, observa-se que o experimento C15 foi o mais eficiente na remoção da cor.

As Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados analíticos para redução de DQO e Fenol nos experimentos.

Tabela 8 - Redução de DQO obtida no tratamento (C)

Experimentos	DQO Final (mg/L)	Redução de DQO (%)	Média (%)	Desvio Padrão
<b>C<sub>15</sub></b>	5.691	4,0	5,1	1,1
<b>C<sub>25</sub></b>	5.538	6,6		
<b>C<sub>35</sub></b>	5.645	4,8		
<b>C<sub>110</sub></b>	5.436	8,3	8,2	0,24
<b>C<sub>210</sub></b>	5.429	8,4		
<b>C<sub>310</sub></b>	5.462	7,9		
<b>C<sub>115</sub></b>	5.146	13,2	12,6	0,69
<b>C<sub>215</sub></b>	5.158	13,0		
<b>C<sub>315</sub></b>	5.241	11,6		

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 9 - Redução de fenol obtida no tratamento C

Experimentos	Fenol Final (mg/L)	Redução de Fenol (%)	Média (%)	Desvio Padrão
<b>C<sub>15</sub></b>	1,2	68,4	69,3	1,24
<b>C<sub>25</sub></b>	1,3	71,0		
<b>C<sub>35</sub></b>	1,2	68,4		
<b>C<sub>110</sub></b>	0,7	81,6	79,8	2,48
<b>C<sub>210</sub></b>	0,7	81,6		
<b>C<sub>310</sub></b>	0,8	76,3		
<b>C<sub>115</sub></b>	0,7	81,6	83,3	1,24
<b>C<sub>215</sub></b>	0,6	84,2		
<b>C<sub>315</sub></b>	0,6	84,2		

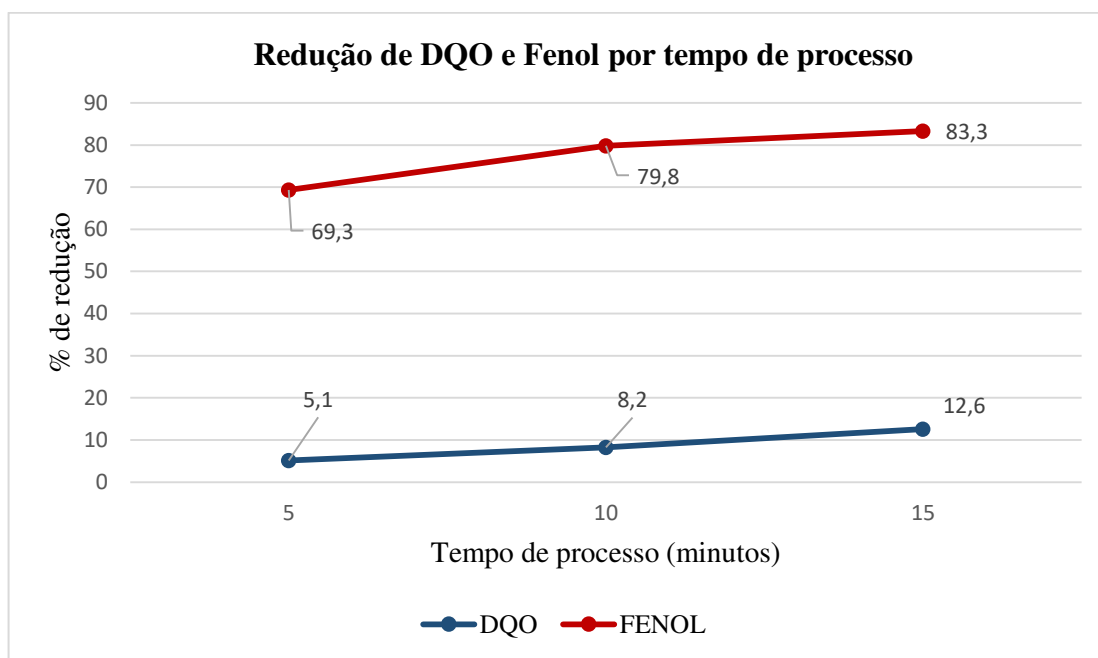
Fonte: Arquivo pessoal.

O tratamento oxidativo se mostrou pouco eficiente no parâmetro de redução de DQO, alcançando um pico médio de 12,6% no processo conduzido por 15 minutos. Porém, muito eficaz do ponto de vista de redução de Fenol, já que as reduções médias foram de 69,3% a 83,3% ao longo do tempo de processo. Os resultados são sustentados pela teoria

anteriormente citada de que o alto potencial oxidativo do ozônio favorece a remoção de fenóis (ROCHA, 2014).

A Figura 18 apresenta o avanço da porcentagem de redução de DQO e Fenol durante o tempo de processo.

Figura 18 - Gráfico de redução de DQO e Fenol por tempo de processo no tratamento oxidativo (C)



Fonte: Arquivo pessoal

O tratamento oxidativo, portanto, se mostrou muito eficaz para a remoção de fenol, apresentando como ponto negativo a baixa redução de DQO. Do ponto de vista da remoção de cor, o tratamento apresentou resultados medianos, se mostrando mais eficaz que o tratamento eletrolítico e menos eficiente que o físico-químico.

Percebeu-se que o experimento conduzido por quinze minutos foi o mais eficaz na remoção de DQO e Fenol. Assim, esse tempo foi escolhido para a integração de processos BC e ABC.

#### 4.5. Tratamento integrado: eletrolítico e físico-químico (AB)

Os experimentos do tratamento integrado AB foram realizados nas mesmas condições dos experimentos individuais.

Para a etapa eletrolítica do tratamento, foi utilizado tempo de processo de 30 minutos, já que este se mostrou mais eficaz.

Na etapa físico-química utilizou-se os níveis alto para PAC e Polímero Aniônico e baixo para o TANFLOC SG (semelhantes ao melhor experimento individual).

A Figura 19 apresenta o efluente ao final do processo de tratamento.

Figura 19 - Amostra após tratamento integrado AB



Fonte: Arquivo pessoal

Foi possível constatar que o efluente apresentou cor e turbidez reduzida em relação aos resultados obtidos nos tratamentos individuais A e B.

As Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados em termos de redução de DQO e Fenol, respectivamente

Tabela 10 - Redução de DQO obtida no tratamento integrado AB

Experimentos	DQO Final (mg/L)	Redução de DQO (%)	Média (%)	Desvio Padrão
AB <sub>1</sub>	1.401	76,4	76,3	0,32
AB <sub>2</sub>	1.431	75,9		
AB <sub>3</sub>	1.385	76,6		

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 11 - Redução de fenol obtida no tratamento integrado AB

<b>Experimentos</b>	<b>Fenol final (mg/L)</b>	<b>Redução de fenol (%)</b>	<b>Média (%)</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>AB<sub>1</sub></b>	1,7	55,3	55,3	0
<b>AB<sub>2</sub></b>	1,7	55,3		
<b>AB<sub>3</sub></b>	1,7	55,3		

Fonte: Arquivo pessoal.

A integração de processos eletrolítico e físico-químico apresentou vantagens em relação aos tratamentos individuais. Na integração foi observada redução de DQO de 76,3% e de Fenol de 55,3%, valores superiores aos encontrados individualmente.

#### 4.6. Tratamento integrado: físico-químico e oxidativo (BC)

Os experimentos do tratamento integrado BC foram conduzidos nas mesmas condições dos experimentos individuais.

Para a etapa físico-química utilizou-se os níveis alto para PAC e Polímero Aniônico e baixo para o TANFLOC SG (semelhantes ao melhor experimento individual).

O tratamento oxidativo foi conduzido por 15 minutos, por ter sido o tempo mais eficaz avaliado individualmente.

A Figura 20 mostra o efluente ao final do processo de tratamento.

Figura 20 - Efluente após tratamento integrado BC



Fonte: Arquivo pessoal

Alguns indicativos da maior eficiência da integração dos processos são as diferenças na cor observada ao final do tratamento integrado em relação aos tratamentos individuais.

As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados em termos de redução de DQO e Fenol, respectivamente.

Tabela 12 - Redução de DQO obtida no tratamento integrado BC

<b>Parâmetros</b>	<b>DQO final (mg/L)</b>	<b>Redução de DQO (%)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>BC<sub>1</sub></b>	1.527	74,2	74,0	0,1373
<b>BC<sub>2</sub></b>	1.546	73,9		
<b>BC<sub>3</sub></b>	1.542	74,0		

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 13 - Redução de fenol obtida no tratamento integrado BC

<b>Parâmetros</b>	<b>Fenol final (mg/L)</b>	<b>Redução de fenol (%)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>BC<sub>1</sub></b>	0,4	89,5	89,5	0
<b>BC<sub>2</sub></b>	0,4	89,5		
<b>BC<sub>3</sub></b>	0,4	89,5		

Fonte: Arquivo pessoal.

Constata-se que a integração dos processos físico-químico e oxidativo foi interessante na união os pontos positivos de cada uma das etapas.

Individualmente o tratamento físico-químico se mostrou eficaz para a redução de DQO. Já o tratamento oxidativo foi o que apresentou os melhores resultados em termos de redução de Fenol.

A integração desses métodos de tratamento permitiu conciliar as forças de cada uma das etapas, atingindo reduções médias de DQO e Fenol de 74,0% e 89,5%, respectivamente.

#### 4.7. Tratamento integrado: eletrolítico, físico-químico e oxidativo (ABC)

Os experimentos do tratamento integrado BC foram realizados nas mesmas condições dos experimentos individuais.

Para a etapa eletrolítica de tratamento, foi utilizado tempo de processo de 30 minutos, já que esse se mostrou mais eficaz.

Na etapa físico-química utilizou-se os níveis alto para PAC e Polímero Aniônico e baixo para o TANFLOC SG (semelhantes ao melhor experimento individual).

O tratamento oxidativo foi conduzido por 15 minutos, por ter sido o tempo mais eficaz avaliado individualmente.



A Figura 21 apresenta o aspecto do chorume ao final do processo de tratamento.

Figura 21 - Amostra após tratamento integrado ABC



Fonte: Arquivo pessoal

Observa-se que essa integração de processos obteve a maior redução em termos de cor entre os tratamentos estudados.

As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados em termos de redução de DQO e Fenol, respectivamente.

Tabela 14 - Redução de DQO obtida no tratamento integrado ABC

Parâmetros	DQO final (mg/L)	% Redução de DQO	Média	Desvio padrão
ABC <sub>1</sub>	1.146	80,7	80,5	0,1
ABC <sub>2</sub>	1.156	80,5		
ABC <sub>3</sub>	1.160	80,4		

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 15 - Redução de fenol obtida no tratamento integrado ABC

<b>Parâmetros</b>	<b>Fenol final (mg/L)</b>	<b>Redução de fenol (%)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>ABC<sub>1</sub></b>	0,4	89,5	89,48	0
<b>ABC<sub>2</sub></b>	0,4	89,5		
<b>ABC<sub>3</sub></b>	0,4	89,5		

Fonte: Arquivo pessoal.

Este tratamento se mostrou o mais eficaz dentre os analisados do ponto de vista de redução de DQO, apresentando redução média de 80,5%. E se equiparou com o tratamento integrado BC na redução de Fenol, 89,5%.

#### 4.8. Pós-tratamento: Filtração em leito de argila expandida e carvão ativado

Após a constatação de que o tratamento integrado ABC foi o de melhor desempenho, foi proposta a realização de um processo de pós-tratamento com a finalidade de possibilitar o seu reuso.

O pós-tratamento consistiu na passagem do efluente previamente tratado por um leito composto de argila expandida e carvão ativado.

O aspecto do efluente final pós filtração é apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Amostra após tratamento integrado ABC e filtração em leito de argila expandida e carvão ativado



Fonte: Arquivo pessoal.

Constatou-se significativa redução de cor após a passagem pelo elemento filtrante. Semelhante constatação ocorreu no estudo de Kawahigashi et al. (2014), no qual o carvão ativado obteve redução de 94 a 100% da coloração quando usado como etapa de pós-tratamento para o chorume.

O efluente final foi submetido a testes de caracterização semelhantes aos realizados com o efluente *in natura*, cujos resultados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Caracterização do chorume ao final do processo de tratamento integrado ABC e filtração em leito de argila expandida e carvão ativado

Parâmetros	Resultados
<b>pH</b>	6,24
<b>Temperatura</b>	24,3 °C
<b>Condutividade</b>	4,12 mS/cm
<b>Fenol</b>	0,4 mg/L
<b>DQO</b>	892 mg/L

Fonte: Arquivo pessoal.

Notou-se que o pH foi reduzido de 7,22 para 6,24 em relação ao chorume inicial. Observa-se redução na condutividade, de 5,85 mS/cm para 4,12 mS/cm, explicada pela remoção de impurezas durante o processo de tratamento. Redução de 89,5% no índice de fenol (de 3,8 mg/L para 0,4 mg/L) e redução de 85,0% de DQO (de 5.929 mg/L para 892 mg/L).

A amostra ao final do processo apresenta parâmetros de pH, temperatura e fenol dentro dos padrões estabelecidos pela RESOLUÇÃO Nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) para reuso de água doce de classe 4, que podem ser destinadas a navegação e harmonia paisagística. Vale ressaltar que essa resolução impõe que sejam analisados diversos outros parâmetros que o presente trabalho não se propôs a analisar.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo individual de cada método de tratamento e a integração entre eles permitiu a observação de algumas particularidades:

- O tratamento eletrolítico (A) foi pouco eficaz individualmente, apresentando baixas reduções para DQO, Fenol e coloração;
- O tratamento físico-químico (B) obteve, individualmente, o melhor valor de redução de DQO e apresentou boa redução de coloração, porém obteve baixa redução de Fenol;
- O processo oxidativo (C) apresentou, individualmente, os melhores valores de redução de Fenol e boa redução de coloração, porém baixa redução de DQO;
- A integração entre os processos permitiu aliar os pontos positivos de cada método de tratamento estudado, prova disso é o fato de que os melhores resultados foram obtidos na integração entre os três métodos de tratamento estudados;
- A técnica de pós-tratamento utilizada (filtração em leito de argila e carvão ativado) foi eficaz para a adequação do chorume para o reuso de acordo com a Resolução N°357 CONAMA (para os parâmetros analisados no trabalho).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, A. A.; JINGSONG, G.; PING, L. Z.; YA, P. Y.; AL-REKABI, W. S. Review on Landfill Leachate Treatments. **Journal of Applied Sciences Research**, v. 5, p. 534-545, 2009.
- ABIOLA, O. N. **Polymers for Coagulation and Flocculation in Water Treatment**. In: [s.l: s.n.] p. 77–92, 2018.
- ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. São Paulo, 2018. Disponível em: < <http://abrelpe.org.br/Panorama/>>. Acesso em 20 abr. 2019.
- APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington: American Public Health Association, 2005.
- AZIZ, H. A.; ALIAS, S.; ADLAN, M. N.; FARIDAH; ASAARI, A. H.; ZAHARI, M. S. Colour removal from landfill leachate by coagulation and flocculation processes. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 1, p. 218–220, jan. 2007.
- BATISTA, L. A.; NAPOLEÃO, D. A. dos S.; FILHO, H. J. H.; SIQUEIRA; A. F. Tratamento por ozonização catalítica do chorume proveniente do aterro sanitário de cachoeira paulista-sp. In: VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, **Anais...**2016.
- BOCCHIGLIERI, M. M. **O Lixiviado dos Aterros Sanitários em Estações de Tratamento dos Sistemas Públicos de Esgotos**. 2010. Universidade de São Paulo, 2010.
- BOLTO, B. A. **Soluble polymers in water purification**. Prog. Polym. Sci. [s.l: s.n.].
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>.
- BRITO, R. A. de. **Ozonização catalítica do chorume proveniente do aterro sanitário de Cachoeira Paulista - SP na presença de ferro em sistema contínuo**. 2014. Universidade de São Paulo, 2014.
- CAMPOS, J. C.; MACHADO, B. da S.; BLONSKI, M. E. D.; BILA, D. M.; FERREIRA, J. A. Evaluation of coagulation/flocculation process in the landfill leachate treatment at the Municipal Wastewater Treatment Plant. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 8, 2013. Disponível em: <[www.ambi-agua.net](http://www.ambi-agua.net)>.
- CERQUEIRA, A. A.; MARQUES, M. R. da C.; RUSSO, C. Avaliação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção. **Química Nova**, v. 34, n. 1, p. 59–63, 2011.
- CHIANGI, L.-C.; CHANGI, J.-E.; WEN, T.-C. Indirect oxidation effect in electrochemical oxidation treatment of landfill leachate. **Water Resources**, v.29, n.2, p.671-678, 1995.
- COSTA, A. M.; ALFAIA, R. G. de S. M.; CAMPOS, J. C. Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. **Journal of Environmental Management**, v.232, p.110-116, 2019.

COSTA, M. D.; MARIANO, M. O. H.; ARAUJO, L. B.; JUCÁ, J. F. T. Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 77–90, 2018.

DENG, Y.; ENGLEHARDT, J. D. Landfill leachate treatment by electrochemical oxidation. **Waste Management**, v. 27, p. 380–388, set. 2007.

DIA, O.; DROGUI, P.; BUELNA, G.; DUBÉ, R. Hybrid process, electrocoagulation-biofiltration for landfill leachate treatment. **Waste Management**, v. 75, p. 391–399, 1 maio 2018.

FERREIRA, G. A. **Ozonização catalítica do chorume do aterro sanitário de Cachoeira Paulista-SP utilizando rejeito industrial de borra de fosfato como reagente em processo batelada**. Lorena: EEL-USP, 2015. 252 p.

GHAFAARI, S.; AZIZ, H. A.; ISA, M. H.; ZINATIZADEH, A. A. Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation-flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum. **Journal of Hazardous Materials**, v. 163, n. 2–3, p. 650–656, 3 abr. 2009.

GOMES, N. A.; ALMEIDA, M. V. de A.; MELO, M. C. de; MONTEIRO, V. E. D.; OLIVEIRA, R. de. Influência de parâmetros físico-químicos na composição de constituintes tóxicos em lixiviado de aterro sanitário. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, 19 out. 2018.

ILHAN, F.; KURT, U.; APAYDIN, O.; GONULLU, M. T. Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 154, n. 1–3, p. 381–389, 15 jun. 2008.

IPT/CEMPRE. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4º ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas/IPT, 2018.

IRFAN, M.; BUTT, T.; IMTIAZ, N. ABBAS, N.; KHAN, R. A.; SHAFIQUE, A. The removal of COD, TSS and colour of black liquor by coagulation–flocculation process at optimized pH, settling and dosing rate. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 10, p. 2307–2318, 2017.

JUNIOR, A. B. de C.; DALSASSO, R. L.; ROHERS, F. Pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários por filtração direta e ascendente e coluna de carvão ativado. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 385–392, 2010.

KAWAHIGASHI, F.; MENDES, M. B.; JÚNIOR, V. G. da A.; GOMES, V. H.; FERNANDES, F.; HIROOKA, E. Y.; KURODA, E. K. Pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário com carvão ativado. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 235–244, 4 out. 2014.

KONRADT-MORAES, L. C.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C.R.G.; BONGIOVANI, M. C.; HENNIG, D. Avaliação da eficiência de remoção de cor e turbidez utilizando como agente coagulante os taninos vegetais com a finalidade de obtenção de água tratada. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais ...2007**.

LABANOWSKI, J.; PALLIER, V.; FEUILLADE-CATHALIFAUD, G. Study of organic matter during coagulation and electrocoagulation processes: Application to a stabilized landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 179, n. 1–3, p. 166–172, jul. 2010.

LOPES, R. L. **Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de**

**aterros de resíduos sólidos.** Pernambuco: Universidade Federal, 2011. 274 p.

LOVATO, M.; BUFFELLI, J. R.; ABRILE, M.; MARTÍN, C. Kinetics and efficiency of ozone for treatment of landfill leachate including the effect of previous microbiological treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 5, p. 4474–4487, 20 fev. 2019.

MANDAL, P.; DUBEY, B. K.; GUPTA, A. K. Review on landfill leachate treatment by electrochemical oxidation: Drawbacks, challenges and future scope. **Waste Management**, v.69, p. 250-270, 1 nov. 2017.

MELLO, V. F. B.; ABREU, J. P. da G.; FERREIRA, J. M.; JUCÁ, J. F. T.; SOBRINHO, M. A. da M. Variáveis no processo de coagulação /floculação/decantação de lixiviados de aterros sanitários urbanos. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 7, n. 2, p. 88–100, 27 ago. 2012.

MOHAJERI, S.; AZIZ, H. A.; ISA, M. H.; ZAHED, M. A. Treatment of landfill leachate by electrocoagulation using aluminum electrodes. **Journal of Applied Research in Water and Wastewater**, v. 10, p. 435–440, 9 mar. 2018.

MORAIS, J. L. de. **Estudo da potencialidade de processos oxidativos avançados - morais 2005.** Paraná: Universidade Federal, 2005. 229 p.

NAYANTHIKA, I. V. K.; JAYAWARDANA, D. T.; BANDARA, N. J. G. J.; MANAGE, P. M.; MADUSHANKA, R. M. T. D. Effective use of iron-aluminum rich laterite based soil mixture for treatment of landfill leachate. **Waste Management**, v. 74, p. 347–361, 1 abr. 2018.

OTENIO, M. H.; PANCHONI, L. C.; CRUZ, G. C. A. da; RAVANHANI, C.; BIDÓIA, E. D. Avaliação em escala laboratorial da utilização do processo eletrolítico no tratamento de águas. **Química Nova**, v. 31, n. 3, p. 508–513, 2008.

PACHECO, J. R.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Integração de processos físico-químicos e oxidativos avançados para remediação de percolado de aterro sanitário (chorume). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 306–311, 5 dez. 2006.

PEDROSO, K.; DIAS, P. Z. Avaliação do tratamento do lixiviado do aterro sanitário de maringá, paraná, por processo de coagulação/floculação com tanfloc sg ®. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 4, n. 2, p. 87–98, 2012.

POBLETE, R.; OLLER, I.; MALDONADO, M. I.; CORTES, E. Improved landfill leachate quality using ozone, UV solar radiation, hydrogen peroxide, persulfate and adsorption processes. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 45–51, 15 fev. 2019.

QUEIROZ, L. M.; AMARAL, M. S.; MORITA, D. M.; YABROUDI, S. C.; SOBRINHO, P. A. Physical-chemical processes as an alternative to pre-and post-treatment of landfill leachate. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 403–410, 2011.

ROCHA, N. H. **Estudo do processo fenton homogêneo na remoção de matéria orgânica do lixiviado da ctr zona da mata.** Juiz de Fora: Universidade Federal, 2014. 58 p.

RUI, L. M.; DAUD, Z.; LATIF, A. A. A. Coagulation-Flocculation In Leachate Treatment Using Combination Of PAC With Cationic And Anionic Polymers. **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)**. [s.l: s.n.], 2012. Disponível em: <www.ijera.com>.



SCHIOPU, A. M.; GAVRILESCU, M. Options for the Treatment and Management of Municipal Landfill Leachate: Common and Specific Issues. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 38, n. 12, p. 1101-1110, dez. 2010.

SIL, A.; KUMAR, S. Landfill Leachate Treatment. In: **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Solid Waste Management**. [s.l.] Elsevier Inc., 2016. p. 391–406.

SILVA, F. B. da. **Tratamento combinado de lixiviados de aterros sanitários**. Rio de Janeiro: Universidade Federal, 2009. 118 p.

SOUZA, J. B. de. **Avaliação de métodos para desinfecção de água, empregando cloro, ácido peracético, ozônio e o processo de desinfecção combinado**. São Carlos: USP, 2006. 190 p.

SUN, T.; LIU, L.; WANG, L.; ZHANG, Y. Preparation of a novel inorganic polymer coagulant from oil shale ash. **Journal of Hazardous Materials**, v. 185, n. 2–3, p. 1264–1272, 30 jan. 2011.

TANAC. **Tanfloc SG**: Catálogo, 1999. Disponível em: <<http://www.tanac.com.br/pt-br/produtos/aguas>>.

TATSI, A. A.; ZOUBOULIS, A. I.; MATIS, K. A.; SAMARAS, P. Coagulation-flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. **Chemosphere**, v. 53, n. 7, p. 737–744, 2003.

TREVISAN, T. S. **Coagulante tanfloc sg como alternativa ao uso de coagulantes químicos no tratamento de água na eta cafezal trabalho de conclusão de curso**. Londrina: Universidade Federal, 2014.106 p.

VILELA-RIBEIRO, E. B.; COSTA, L. S. O.; LIMA-RIBEIRO, M. de S.; SOUSA, M. H. de. Uma abordagem normativa dos resíduos sólidos de saúde e a questão ambiental. **Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, v. 22, p. 168–176, 2009.

WANG, H.; LI, X.; HAO, Z.; SUN, Y.; WANG, Y. LI, W.; TSANG, Y. Transformation of dissolved organic matter in concentrated leachate from nanofiltration during ozone-based oxidation processes (O<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>/UV). **Journal of Environmental Management**, v. 191, p. 244–251, 15 abr. 2017.

ZAMRI, M. F. M. A.; AZIZ, H. A.; YUSOFF, M. S. The application of crosslinking oil palm trunk starch coagulants for landfill leachate treatment. **International Journal of Environmental Engineering**, v. 9, n. 2, p. 130, 6 ago. 2018.

## **ANEXO**

### **TERMO DE PERMISSÃO DE USO DE INFORMAÇÕES**

Através deste termo, nós da ARATU AMBIENTAL LTDA, declaramos que estamos de acordo com a utilização das informações desta empresa no Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DO CHORUME POR INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS ELETROLÍTICOS, FÍSICO-QUÍMICOS E OXIDATIVOS AVANÇADOS” desenvolvido pelo aluno WILLIAM MULLER MEYER, a ser apresentado à Escola de Engenharia de Lorena no primeiro semestre de 2020.

Taubaté, 12 de dezembro de 2019

Vinicius de Lima Nunes

Diretor da área ambiental