

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ALFREDO RODRIGO LINS MACHADO**

**AVALIAÇÃO DO USO DE LODO DO TRATAMENTO  
FÍSICO-QUÍMICO COMO AUXILIAR DE COAGULAÇÃO PARA  
TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE CERVEJARIA**

**LONDRINA**

**2022**

**ALFREDO RODRIGO LINS MACHADO**

**AVALIAÇÃO DO USO DE LODO DO TRATAMENTO  
FÍSICO-QUÍMICO COMO AUXILIAR DE COAGULAÇÃO PARA  
TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE CERVEJARIA**

**EVALUATION OF THE USE OF TREATMENT SLUDGE  
PHYSICOCHEMICAL AS A COAGULATION AID FOR TREATMENT OF  
BREWERY WASTEWATER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus Londrina*, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Bruno de Oliveira Freitas.

Co orientador: Luan de Souza Leite.

**LONDRINA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ALFREDO RODRIGO LINS MACHADO**

**AVALIAÇÃO DO USO DE LODO DO TRATAMENTO  
FÍSICO-QUÍMICO COMO AUXILIAR DE COAGULAÇÃO PARA  
TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE CERVEJARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de  
Graduação/ Especialização apresentado como  
requisito para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 14/dezembro/2022

---

**Prof. Dr. Ajadir Fazolo**  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR)

---

**Profa. Dra. Joseane Débora Peruço Theodoro**  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR)

---

**Prof. Dr. Bruno de Oliveira Freitas**  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR)  
Orientador

**LONDRINA**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por todas as possibilidades e oportunidades colocadas em minha vida, estando ao meu lado em cada obstáculo, me dando forças para seguir em frente e iluminando meu caminho.

Agradeço minha família, em especial meus pais e minha irmã, se hoje estou onde me encontro, muito se deve a eles, por toda a educação dada, todo o investimento feito e todo o amor que me deram, sendo sempre meu alicerce e minha fonte de inspiração.

À Victória R. Macieirinha, minha noiva e a mulher que há 9 anos eu compartilho os melhores momentos da vida, que me ensina cada dia mais como ser a melhor versão de mim mesmo e meu exemplo de determinação.

Aos meus amigos de faculdade, em especial o grupo “Junin da 11”, que fizeram com que os momentos difíceis parecessem leves em meio ao companheirismo e tantas boas risadas.

Meu muito obrigado à toda equipe Machado Burger por toda a compreensão, parceria, paciência e dedicação nos momentos que a vida profissional contrastou com a vida acadêmica.

Equipe INBEB, pela oportunidade de trabalho, pela oportunidade de me conhecer melhor e de possibilitarem que eu aprendesse com os meus próprios erros.

Aos colegas de trabalho da Gaia Jr onde descobri a veia empreendedora e me possibilitaram enxergar a Engenharia Ambiental por diferentes maneiras.

Por fim, a todo o corpo docente da minha graduação, em nome do meu Orientador professor Bruno Freitas, agradeço por compartilharem momentos preciosos através do dom que lhes foi dado que é a arte de ensinar.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar o tratamento físico-químico da água residuária de uma cervejaria localizada no município de Londrina – PR, utilizando o lodo gerado no tratamento como auxiliar de coagulação. No presente estudo os ensaios foram divididas em 4 grupos, dentro de cada grupo variando o pH e a concentração de sulfato de alumínio. O primeiro tratamento foi feito utilizando apenas o coagulante sulfato de alumínio para o tratamento. No segundo grupo foi utilizado o lodo gerado no primeiro tratamento combinado com o sulfato de alumínio. Então após o tratamento foi comparado os valores obtidos em cada um dos dois grupos. O terceiro grupo de tratamento assim como o primeiro, foi feito utilizando-se apenas o coagulante sulfato de alumínio. Já no quarto e último grupo foi utilizado o lodo gerado no tratamento anterior, porém antes de utilizar no tratamento o lodo foi acidificado e daí então combinado com o sulfato de alumínio para o tratamento. Após os dois tratamentos foi feita a comparação dos resultados obtidos. Os melhores valores de remoção de turbidez para cada um dos quatro grupos foram de 95,06% de remoção com pH 7 e concentração 100 mg/L para o grupo 1, com pH 5 e concentração 50 mg/L + lodo – 86,71% de remoção para o grupo 2, com pH 5 e concentração 100 mg/L – 97,31% de remoção para o grupo 3 e por fim pH 7 e concentração 50 mg/L + lodo acidificado – 94,46% de remoção para o grupo 4. A geração de lodo obteve valores entre 0 mL/L (pH 7 e pH 9 com concentrações de 60 mg/L de sulfato) até 165 mL/L (pH 7 com concentração de 50 mg/L combinado com LA). Quanto ao alumínio residual os valores obtidos foram na ordem de 1,87% até 7,17% quando analisado os tratamentos feitos utilizando apenas o sulfato de alumínio (grupos 1 e 3).

**Palavras-chave:** Estação de tratamento de efluentes, lodo acidificado, coagulação, recuperação de recursos, efluente industrial.

## ABSTRACT

This work aimed to analyze the physical-chemical treatment of wastewater from a brewery located in the city of Londrina - PR, using the sludge generated in the treatment as a coagulation aid. In the present study, the analyzes were divided into 4 groups and within each group varying pH and aluminum sulfate concentration. The first treatment was performed using only the aluminum sulfate coagulant for the treatment. In the second group, the sludge generated in the first treatment combined with aluminum sulfate was used. Then, after treatment, the values obtained in each of the two groups were compared. The third treatment group, like the first, was performed using only the aluminum sulfate coagulant. In the fourth and last group, the sludge generated in the previous treatment was used, but before using it in the treatment, the sludge was acidified and then combined with aluminum sulfate for the treatment. After the two treatments, the results obtained were compared. The best turbidity removal values for each of the four groups were 95.06% removal with pH 7 and concentration 100 mg/L for group 1, with pH 5 and concentration 50 mg/L + sludge – 86.71 % removal for group 2, with pH 5 and concentration 100 mg/L – 97.31% removal for group 3 and finally pH 7 and concentration 50 mg/L + acidified sludge – 94.46% removal for group 4. The generation of sludge obtained values between 0 mL/L (pH 7 and pH 9 with concentrations of 60 mg/L of sulfate) to 165 mL/L (pH 7 with concentration of 50 mg/L combined with LA). As for residual aluminum, the values obtained were in the order of 1.87% to 7.17% when analyzing the treatments made using only aluminum sulfate (groups 1 and 3).

**Key-words:** Effluent treatment plant, acidified sludge, coagulation, resource recovery, industrial wastewater.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Demonstração do mecanismo de varredura usando o sulfato de alumínio .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2 – Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 3 – Local de coleta na estação de tratamento de efluentes .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 4 – Bombona utilizada para transporte na coleta .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 5 – Equipamento Jar Test .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 6 – Concentrações de sulfato e valores de pH de cada amostra ...</b>	<b>25</b>
<b>Figura 7 – Cone imhoff utilizado para medir a geração de lodo .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 8 – Aparato utilizado para retirar o lodo .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 9 – Amostras após a sedimentação .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 10 – Performance de remoção entre o grupo 1 e o grupo 2 .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 11 – Turbidez residual do grupo 1 comparado com o grupo 2 .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 12 – Performance de remoção entre o grupo 3 e o grupo 4 .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 13 – Turbidez residual do grupo 3 comparado com o grupo 4 .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 14 – Geração de lodo do grupo 1 e 2, lado a lado .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 15 – Geração de lodo do grupo 3 e 4, lado a lado .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 16 – Alumínio residual do grupo 1 e 2, lado a lado .....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 17 – Alumínio residual do grupo 3 e 4, lado a lado .....</b>	<b>44</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização da água residuária de cervejaria .....	14
Tabela 2 - Valores de caracterização do sobrenadante .....	20
Tabela 3 - Divisão dos grupos das análises .....	23
Tabela 4 – Caracterização da água bruta referente ao grupo 1.....	28
Tabela 5 – Caracterização da água bruta referente ao grupo 2.....	28
Tabela 6 – Caracterização da água bruta referente ao grupo 3.....	28
Tabela 7 – Caracterização da água bruta referente ao grupo 4.....	29
Tabela 8 – Valores obtidos do tratamento do grupo 1 .....	29
Tabela 9 – Valores obtidos do tratamento do grupo 2 .....	30
Tabela 10 – Valores obtidos do tratamento do grupo 3 .....	30
Tabela 11 – Valores obtidos do tratamento do grupo 4 .....	31
Tabela 12 – Comparação grupo 1 e 2 pH 5 e diferentes concentrações...	34
Tabela 13 – Comparação grupo 1 e 2 pH 7 e diferentes concentrações...	35
Tabela 14 – Comparação grupo 1 e 2 pH 9 e diferentes concentrações...	35
Tabela 15 – Comparação grupo 3 e 4 pH 5 e diferentes concentrações...	38
Tabela 16 – Comparação grupo 3 e 4 pH 7 e diferentes concentrações...	38
Tabela 17 – Comparação grupo 3 e 4 pH 9 e diferentes concentrações...	39
Tabela 18 – Lodo gerado no tratamento dos grupos 1 e 2 .....	40
Tabela 19 – Lodo gerado no tratamento dos grupos 3 e 4 .....	41
Tabela 20 – Valores obtidos de alumínio residual do tratamento do grupo 1 e 2.....	43
Tabela 21 – Valores obtidos de alumínio residual do tratamento do grupo 3 e 4.....	43
Tabela 22 – Porcentagens de alumínio residual nas amostras de tratamento com $Al_2(SO_4)_3$ apenas .....	45



## **ABREVIATURAS E SIGLAS**

**CIP - CLEAN IN PLACE**

**MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO**

**pH – POTENCIAL HIDROGENIÔNICO**

**DBO – DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO**

**DQO - DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO**

**PNRS – POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

**CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE**

**ETE – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES**

**LETA – LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

**L - LODO**

**LA – LODO ACIDIFICADO**

**(Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> – SULFATO DE ALUMÍNIO**

**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – ÁCIDO SULFÚRICO**

## SUMÁRIO

<b>ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>9</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
2.1. Objetivo geral .....	13
2.2. Objetivos específicos .....	13
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
3.1. Características das águas residuária de cervejaria .....	14
3.2. Tratamento físico-químico das águas residuárias de cervejarias .....	15
3.2.1. Coagulação .....	15
<u>3.2.1.1. Mecanismo de varredura .....</u>	<u>17</u>
3.2.2. Floculação.....	17
3.2.3. Sedimentação .....	17
3.2.4. Coagulantes .....	18
3.3. Geração de lodo .....	18
3.4. Acidificação do lodo .....	20
3.5. Recuperação de coagulante presente no lodo.....	20
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
4.1. Água residuária de cervejaria .....	21
4.1.1. Caracterização da água residuária.....	22
4.2. Ensaio de tratabilidade com sulfato de alumínio e lodo .....	22
4.3. Método de realização do ensaio de tratabilidade .....	24
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>28</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>46</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>47</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil vem ganhando destaque quando o assunto é abertura de novas cervejarias, no ano de 2013, 195 cervejarias estavam registradas no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) sete anos depois em 2020 foram contabilizadas 1383 cervejarias (MAPA, 2021).

A água residuária proveniente do processo de fabricação da cerveja é considerada muito poluidora devido ao fato de conter inúmeros resíduos, tais como bagaço de malte, cevada úmida e fermento, resultando em altas concentrações de matéria orgânica (ARRUDA et al., 2015). Além disso, a etapa de limpeza realizada durante o processo fabril seja ela para limpeza de garrafas ou para *clean in place* (CIP) realizada nos equipamentos e áreas de produção. Na limpeza usualmente utilizam detergentes alcalinos e posteriormente ocorre a limpeza com produtos como soda cáustica, hipoclorito de sódio ou ácidos tais como o ácido peracético. Analogamente à complexidade das características dos resíduos exige-se tratamentos que tenham eficiência suficiente para reduzir as cargas presentes nas águas residuárias (ENITAN et al., 2015).

Os processos físico-químicos de coagulação, floculação e sedimentação podem ser considerados como uma das técnicas mais difundidas para tratar águas residuárias das cervejarias. A coagulação ocorre por causa da adição de produto químico, sendo o sulfato de alumínio o coagulante mais utilizado para tratamento de águas residuárias (AHMAD et al., 2016).

Um ponto negativo do tratamento físico-químico é a grande geração de lodo. (LAZZARI, 2018). O lodo resultante do tratamento de águas residuárias pode causar vários problemas ambientais se a disposição no ambiente não é adequada, tais como: toxicidade aos organismos aquáticos, degradação do ambiente de despejo e as altas concentrações de sólidos podem levar ao aumento de turbidez e possíveis cenários que não são favoráveis para o meio aquático como a criações/formação de banco de lodo e assoreamento do curso d'água (BARBOSA et al., 1999). Na literatura encontra-se alternativas à disposição do lodo, como fabricação de tijolos refratários, pavimentação de estradas aplicação no solo agrícola, fabricação de cimento, compostagem e a recirculação para auxiliar a floculação A recuperação de alumínio presente no lodo de estação de tratamento de águas residuárias é possível, mas

ocorre por meio da aplicação de ácido sulfúrico em baixos valores de pH (1 a 4) (SUSTENT et al., 2020).

Diante do exposto, a utilização do lodo do tratamento físico-químico como auxiliar da coagulação é interessante e no presente estudo foi avaliado a utilização do lodo proveniente do tratamento físico-químico como auxiliar de coagulação juntamente com o sulfato de alumínio para tratamento de água residuária de cervejaria, por meio da coagulação, floculação e sedimentação.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral do trabalho foi analisar a influência dos tipos de recuperação do lodo e bem como utilizá-lo no tratamento físico-químico como auxiliar de coagulação do sulfato de alumínio para tratamento de água residuária de cervejaria.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar o tratamento da água residuária variando as concentrações de sulfato de alumínio e do pH;
- Avaliar a eficácia do tratamento da água residuária variando o tratamento apenas com o sulfato, sulfato de alumínio + L e sulfato de alumínio + LA.
- Avaliar a quantidade de lodo gerado no tratamento apenas com sulfato de alumínio e também no tratamento com sulfato de alumínio + L e sulfato de alumínio + LA.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. CARACTERÍSTICAS DAS ÁGUAS RESIDUÁRIA DE CERVEJARIA

A água residuária de cervejaria é composta, em sua maior parte, por resíduos advindos da fabricação, como bagaço de malte, fermento e cevada úmida, os quais são resíduos orgânicos, juntamente com os compostos químicos da limpeza efetuada com produtos alcalinos e ácidos.

As análises da água residuária gerada na cervejaria caracterizam-se principalmente pelos altos valores de DBO, DQO e sólidos suspensos totais. Sendo classificada como uma água residuária rica em matéria orgânica que é altamente biodegradável (ENITAN et al., 2015).

Na tabela a seguir pode-se observar a caracterização da água residuária segundo ARRUDA, et al., 2015.

**Tabela 1 - Caracterização da água residuária de cervejaria.**

VARIÁVEIS	RESULTADO	UNIDADE
Temperatura	19,7	°C
pH	5,2	-
Oxigênio dissolvido	4,1	mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>
DQO total	4540	mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>
DBO <sub>5,20</sub>	1048	mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>
N <sup>-</sup> NH <sub>3</sub>	12,6	mgN L <sup>-1</sup>
N <sup>-</sup> NO <sub>2</sub>	0,8	mgN L <sup>-1</sup>
N <sup>-</sup> NO <sub>3</sub>	8,4	mgN L <sup>-1</sup>
P total	180	mgP L <sup>-1</sup>
P <sup>-</sup> PO <sub>4</sub> solúvel	128	mgP L <sup>-1</sup>
Cor Aparente	500	mgPt-Co L <sup>-1</sup>
Cor Verdadeira	250	mgPt-Co L <sup>-1</sup>
Turbidez	124	mg/L
Sólidos Sedimentáveis	0,5	mg/L
Sólidos Totais	1110	mg/L
Sólidos Suspensos Totais	560	mg/L
Sólidos Suspensos Voláteis	210	mg/L
Sólidos Suspensos Fixos	350	mg/L
Sólidos Dissolvidos Totais	550	mg/L

Fonte: (ARRUDA et al., 2015)

## **3.2. TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE CERVEJARIAS**

O tratamento por via físico-química, considerando os processos de coagulação, floculação e sedimentação são amplamente utilizados no âmbito da engenharia ambiental, pela simplicidade de operação e por seu desempenho técnico, podendo ser aplicado diretamente na água residuária para remoção de compostos orgânicos junto com sólidos em suspensão (FORTINO, 2012; BOURANENE *et al.*, 2015).

Nas etapas de coagulação e floculação a função é de aglomerar impurezas que por sua vez encontram-se em estado coloidal, posteriormente essas impurezas são removidas por sedimentação.

### **3.2.1. COAGULAÇÃO**

Entende-se por coloides o aglomerado de átomos ou moléculas no qual encontram-se em tamanho muito pequeno, fazendo com que a gravidade não tenha nenhum ou pouco efeito sobre a partícula, sendo assim o mesmo pode levar muito tempo para sedimentação ou até mesmo permanecer em suspensão. Tal estabilização pode ser explicada por meio das cargas dos coloides, onde a repulsão entre elas ocorre por suas cargas elétricas negativas (FORTINO, 2012).

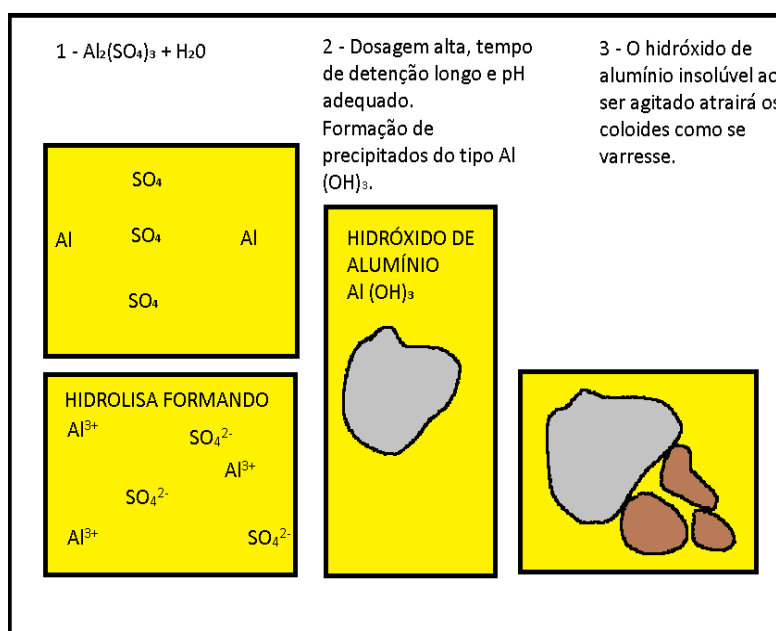
Dois tipos de coagulantes são os mais utilizados para tratamento físico-químico, são eles: os sais metálicos (inorgânicos), como o Cloreto Férrico e o Sulfato de Alumínio e as macromoléculas orgânicas, como o tanino (HUANG; SCHWAB; JACANGELO, 2009).

Considera-se a coagulação uma resultante da ação de quatro mecanismos distintos sendo eles: compressão da camada difusa, adsorção e neutralização, adsorção/formação de pontes e varredura. (KONRADT-MORAES, 2009).

### 3.2.1.1. MECANISMO DE VARREDURA

O mecanismo de varredura ocorre quando se utiliza coagulantes em doses elevadas, a ponto de formar um precipitado. Utilizando o sulfato de alumínio, quando esse entra em contato com a água é formado o hidróxido de alumínio, que quando precipita envolve os coloides em suspensão e as demais partículas suspensas formando flocos ainda maiores, como pode ser observado na figura 1.

**Figura 1 – Demonstração do mecanismo de varredura usando o sulfato de alumínio.**

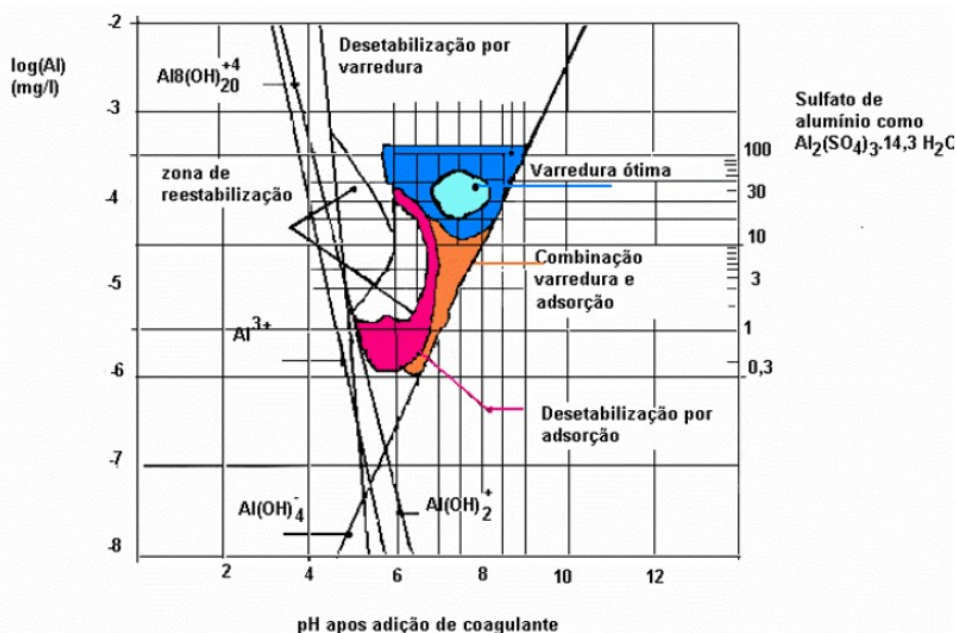


Fonte: Autoria própria.

Na figura 2 observa-se o gráfico elaborado por Amirtharajah e Mills (1982) onde foi registrado o uso do coagulante sulfato de alumínio e as linhas que se alteram em diferentes regiões evidenciando qual seria o pH ideal quando combinado com a concentração e dosagem correta de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  para obtenção do mecanismo de varredura.



Figura 2 - Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio.



Fonte: Amirtharajah e Mills (1982).

### 3.2.2. FLOCULAÇÃO

Entende-se pela etapa de floculação o momento em que as partículas menores desestabilizadas se associam às partículas maiores formando aglomerados ou flocos.

Durante a floculação faz-se necessário a agitação em um gradiente de velocidade mais baixo, porém suficiente para formar os flocos.

À medida que a água residuária passa através da unidade de floculação o gradiente de velocidade deve ser reduzido (gradiente decrescente) de modo que o floculador promova o choque entre os flocos, mas evita a ruptura (FORTINO, 2012).

### 3.2.3. SEDIMENTAÇÃO

A sedimentação é o processo no qual as partículas apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica, o movimento ocorre pela ação da gravidade. A sedimentação juntamente com as etapas anteriores de coagulação e floculação é responsável pela clarificação da água residuária, configurando a separação das fases sólidas e líquidas (DANTAS; DI BERNARDO; VOLTAN, 2008).

### **3.2.4. COAGULANTES**

O uso de coagulantes como complemento para o tratamento de efluentes da indústria cervejeira é considerado uma das formas mais adequadas segundo (JANZ et al., 2020), utilizando-se não somente coagulantes inorgânicos como o Sulfato de Alumínio, mas também coagulantes orgânicos como o Tanino extraído da Moringa oleífera.

Porém, dentre os agentes químicos, os sais metálicos são os mais difundidos como coagulantes para remoção de impurezas, como as partículas coloidais.

Segundo (KONRADT-MORAES, 2009), utiliza-se geralmente coagulantes que tenham em suas cadeias íons de alumínio e ferro ou polímeros, sendo o sulfato de alumínio o mais eficiente quando os valores de pH encontram-se entre 5,5 a 8,0.

### **3.3. GERAÇÃO DE LODO**

A grande problemática hoje encontra-se no descarte correto do lodo gerado, segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) no ano de 2020 apenas 55,0% do esgoto gerado foi coletado no Brasil, e somente 50,8% desse valor foi tratado.

O lodo gerado na ETE representa cerca de 1 a 2% do volume total de esgoto tratado, porém o tratamento e a disposição final desse lodo podem chegar a atingir valores entre 30% e 50% de todo o custo operacional da ETE (ANDREOLI et al., 1999).

A geração do lodo pode ser tratada utilizando diversos tipos de coagulantes assim como já foi visto anteriormente, segundo (JANZ et al., 2020), o coagulante orgânico é uma solução interessante para o tratamento de águas residuárias visto que esse gera menos lodo que os coagulantes inorgânicos.

Na legislação pode-se acompanhar através da Lei 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), onde dispõe sobre objetivos, diretrizes, princípios e instrumentos a qual foi regulamentada pelo decreto Nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022.

Para o melhor gerenciamento do lodo é necessário que o mesmo passe por um processo de tratamento, que é dividido basicamente nas seguintes etapas:

Adensamento, digestão ou estabilização, condicionamento, desaguamento ou desidratação, higienização e disposição final (NOZELA, 2014).

Durante o adensamento busca remover a umidade presente no lodo. Na digestão o objetivo é remover a matéria orgânica buscando reduzir os sólidos voláteis. Durante o condicionamento é uma etapa preparatória para a etapa seguinte, a desidratação, onde busca reduzir novamente a umidade e diminuir o volume. Na etapa de higienização, remove-se os organismos patogênicos e a disposição final é a disposição dos subprodutos gerados no tratamento do lodo (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

Após todo esse processo de tratamento, atendendo todos os critérios dispostos no CONAMA 375 de 29 de agosto de 2006, onde define os critérios de uso do lodo de ETE para fins agrícolas.

Segundo (CARDOSO, 2003), ao analisar a geração de lodo utilizando diversos coagulantes tais como, Sulfato de Alumínio, Sulfato Férrico, Policloreto de Alumínio, Cloreto Férrico, Polifloc, Flocculan, Sulfato Ferroso e Polímero Catiônico Médio para tratamento de LETA, obteve-se os seguintes resultados: Com amostras de água com turbidez baixa (31,6 NTU) e turbidez média (246 NTU) os menores resultados em termos de geração de lodo foi obtido com o coagulante sulfato férrico. Entretanto em amostras com turbidez alta (806 NTU) o melhor resultado foi com o Polieletrólito catiônico médio.

Ao analisar os resultados obtidos no tratamento de efluentes de uma indústria de tintas por (ABOULHASSAN et al., 2006), constatou-se que ao adicionar auxiliares de coagulante no tratamento, o volume de lodo gerado reduz quando comparado com o tratamento feito apenas com o coagulante sozinho, é o caso do cloreto férrico, que gerou 198 ml/L de lodo e quando comparado com o cloreto férrico adicionado de um polieletrólito gerou 90 ml/L.

Além de analisar o lodo gerado, (ABOULHASSAN et al., 2006) precificou o custo do tratamento com base no coagulante usado, o cloreto férrico quando utilizado sozinho no tratamento possui um custo de 0,453 euros/m<sup>3</sup> sendo o custo mais barato encontrado quando comparado a adição de qualquer outro auxiliar de coagulação.

### 3.4. ACIDIFICAÇÃO DO LODO

A recuperação do lodo por via ácida começou a ser estudada a muito tempo e desde então testaram diferentes configurações, podendo ser feita pela via ácida adicionando ácido sulfúrico ou ácido clorídrico em lodos contendo ferro ou alumínio (GUIMARÃES, 2005).

O processo consiste basicamente em adicionar ácido ao lodo mantendo um pH baixo (em torno de 2) afim de que possa transformar os hidróxidos de alumínio presentes no lodo em espécies químicas solúveis de alumínio (JULIO; SANTOS; OROSKI, 2009).

Conforme analisado por (PEDRETTI ANGELA, 2020), o processo de recuperação por via ácida possui bons resultados de minimização na geração de lodo e na recuperação de coagulante quando utilizado o pH 2,0.

### 3.5. RECUPERAÇÃO DE COAGULANTE PRESENTE NO LODO

A recuperação dos coagulantes presentes no lodo pode encontrar barreira para aplicação no tratamento de água para abastecimento, no entanto a aplicação do lodo para auxiliar o tratamento de água residuária pode ser muito promissor.

Na literatura encontra-se duas técnicas para recuperação de coagulante, a saber a acidificação e a utilização direta do lodo. A recuperação por acidificação é mais frequente, por viabilizar liberação de grandes concentrações de metal, tais como recuperação de alumínio, ferro e manganês. (PEDRETTI; MEDEIROS, 2020)

PEDRETTI e MEDEIROS (2020), acidificaram o LETA (lodo de estação de tratamento de água) variando o pH nos seguintes valores: 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e obtiveram o seguinte resultado de caracterização do sobrenadante para a remoção dos seguintes elementos:

**Tabela 2 - Valores de caracterização do sobrenadante.**

pH	1,0	2,0	3,0	4,0
Alumínio	173,080	158,180	64,057	14,243
Ferro	64,090	41,330	27,880	24,149
Manganês	5,175	6,486	5,319	4,862

Fonte: (PEDRETTI; MEDEIROS, 2020)

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O sistema de tratamento foi montado no laboratório do curso de Engenharia Ambiental.

### 4.1. ÁGUA RESIDUÁRIA DE CERVEJARIA

A amostra de água residuária foi coletada em uma indústria do ramo cervejeiro, localizada na região metropolitana de Londrina. Utilizou-se água residuária bruta coletada logo após a saída do tanque de equalização, diretamente na caixa de mistura antes de entrar nas lagoas anaeróbias. Na figura 3 verifica-se o local da coleta.

**Figura 3 – Local de coleta na estação de tratamento de efluentes.**



**Fonte: Autoria própria.**

O material foi coletado no início de cada semana, foi armazenado e transportado em bombonas de 50 litros, conforme figura 4. Sendo realizadas duas coletas, cada uma dessas coletas utilizadas para análises no decorrer da mesma semana.

**Figura 4 - Bombona utilizada para transporte na coleta.**



**Fonte: Autoria própria.**

#### **4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA RESIDUÁRIA**

A caracterização da água residuária foi realizada na mesma semana em que foram realizadas as coletas, sendo feitas as análises de pH e turbidez da amostra bruta em duplicata e triplicata respectivamente.

As análises foram feitas de acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).

#### **4.2. ENSAIOS DE TRATABILIDADE COM SULFATO DE ALUMÍNIO E LODO**

Para as análises as amostras foram divididas em 4 grupos, sendo o primeiro grupo as amostras tratadas somente com coagulante sulfato de alumínio. O segundo

grupo foi tratamento com sulfato de alumínio combinado com o lodo gerado no primeiro grupo.

O terceiro grupo foi tratado novamente apenas com coagulante sulfato de alumínio, porém o lodo gerado em seu tratamento foi acidificado com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). No grupo quatro foi feito o tratamento com sulfato de alumínio combinado com o lodo acidificado do tratamento anterior.

As análises foram feitas variando o pH entre 5, 7 e 9, dentro de cada um dos 4 grupos, e para cada valor de pH foi feito o tratamento com diferentes concentrações de sulfato de alumínio, variando entre os valores conforme pode-se observar um panorama dos 4 grupos na tabela a seguir.

**Tabela 3 - Divisão dos grupos das análises.**

<b>GRUPO 1</b>		<b>GRUPO 2</b>	
CONCENTRAÇÃO $Al_2SO_4$ (mg/L)	pH	CONCENTRAÇÃO $Al_2SO_4$ (mg/L)	pH
60	5	30 +LODO	5
80	5	40 +LODO	5
100	5	50 +LODO	5
60	7	30 +LODO	7
80	7	40 +LODO	7
100	7	50 +LODO	7
60	9	30 +LODO	9
80	9	40 +LODO	9
100	9	50 +LODO	9

<b>GRUPO 3</b>		<b>GRUPO 4</b>	
CONCENTRAÇÃO $Al_2SO_4$ (mg/L)	pH	CONCENTRAÇÃO $Al_2SO_4$ (mg/L)	pH
60	5	30 +LODO ACIDIFICADO	5
80	5	40 +LODO ACIDIFICADO	5
100	5	50 +LODO ACIDIFICADO	5
60	7	30 +LODO ACIDIFICADO	7
80	7	40 +LODO ACIDIFICADO	7
100	7	50 +LODO ACIDIFICADO	7
60	9	30 +LODO ACIDIFICADO	9
80	9	40 +LODO ACIDIFICADO	9
100	9	50 +LODO ACIDIFICADO	9

**Fonte: Autoria própria.**

Devido ao número de análises feitas e considerando a escala reduzida de uso dos laboratórios em função da pandemia e também a necessidade de utilizar uma amostra recém coletada, a água residuária utilizada para as amostras do grupo 1 e 2 são diferentes da água residuária utilizada nas análises dos grupos 3 e 4.

As amostras foram coletadas no mesmo ponto, porém em datas diferentes isso influenciou no resultado final esperado quando comparado por exemplo o grupo 1 e o grupo 3 onde os tratamentos são iguais e as concentrações também. Além disso, deve-se levar em consideração toda a produção industrial que segue um padrão de fabricação baseado na demanda de pedidos e não um padrão pré-estabelecido em dias semanais, alterando as características individuais da amostra.

### 4.3. MÉTODO DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE TRATABILIDADE

Após a medição de pH e turbidez da amostra bruta foi dado início ao tratamento da água residuária referente ao grupo 1, esse grupo totalizou 9 amostras, conforme indicado anteriormente. Para o tratamento foi utilizado o equipamento Jar Test (modelo 6 jarros) Nova Ética (ver figura 5).

Figura 5 – Equipamento Jar Test.



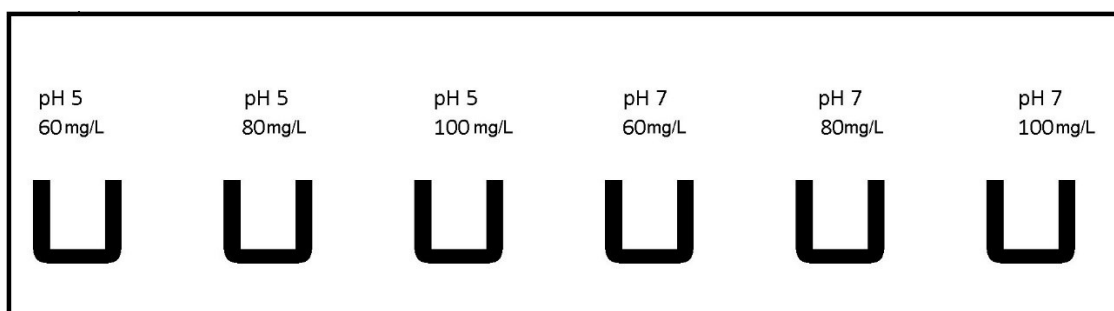
Fonte: Autoria própria.

A amostra foi colocada nos seis jarros, primeiramente foram as três amostras de pH 5 e mais três amostras de pH 7. Foi acionado o sistema com altas rotações de gradiente  $800 \text{ s}^{-1}$ , em seguida adicionou-se simultaneamente o sulfato de alumínio



nas seis amostras, com concentrações: 60 mg/L, 80 mg/L e 100 mg/L para cada valor de pH, conforme ilustrado na figura 6.

**Figura 6 – Concentrações de sulfato e valores de pH de cada amostra.**



**Fonte: Autoria própria.**

Mantendo a rotação alta de gradiente de  $800 \text{ s}^{-1}$ , por um minuto para que houvesse a mistura rápida do efluente com o coagulante, em seguida colocou-se em rotação baixa com gradiente de  $80 \text{ s}^{-1}$  por dez minutos para que ocorresse a floculação. Após isso o equipamento era desligado e depois de cinco minutos era feita a coleta, fazendo as medições dos valores de pH em duplicata e turbidez em triplicata.

Após as análises de pH e turbidez as amostras foram transferidas para o Cone Imhoff, as leituras da geração de lodo foram feitas após uma hora, conforme mostrado na figura 7 que é referente ao tratamento do grupo 3, dos ensaios de pH 5 e pH 7, com as concentrações de 60 mg/L, 80 mg/L e 100 mg/L respectivamente.

**Figura 7 – Cone imhoff utilizado para medir a geração de lodo.**



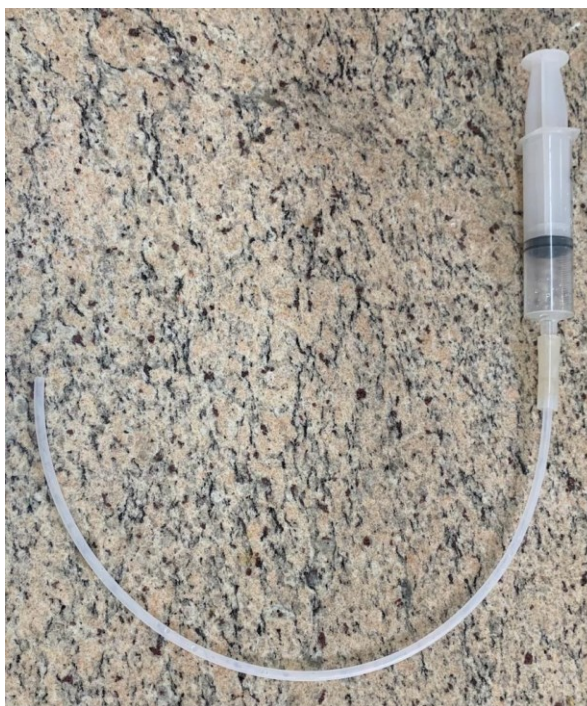
**Fonte: Autoria própria.**

Após o término das 6 primeiras análises, foi dada sequência para as 3 últimas análises do grupo 1, referente ao tratamento das análises com pH 9 da amostra.

O lodo gerado no tratamento referente ao grupo 1 foi reutilizado como auxiliar de coagulação para o tratamento do grupo 2. Sendo assim manteve-se a mesma metodologia do tratamento para o grupo 2, porém durante a dosagem de sulfato de alumínio as concentrações foram de 30 mg/L, 40 mg/L e 50 mg/L, combinado com o lodo residual do tratamento do grupo 1.

O lodo foi removido utilizando uma seringa e uma mangueira para fazer a sucção do mesmo do fundo de cada cone Imhoff, segue o aparato utilizado na figura 8.

**Figura 8 – Aparato utilizado para retirar o lodo.**



**Fonte: Aatoria própria.**

Assim como foi realizado o tratamento do grupo 1, no tratamento do grupo 3 foi utilizado somente o sulfato de alumínio como coagulante, sem uso do lodo e mantendo todos os demais processos para o tratamento.

Já no grupo 4 foi utilizado o lodo gerado no tratamento 3, combinado com o  $Al_2SO_4$ , porém o lodo utilizado dessa vez foi acidificado anteriormente com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), até que o mesmo atingisse o valor de pH 2, afim de que conseguisse uma melhor sedimentação do resíduo (GUIMARÃES, 2005).

Todo o tratamento do grupo 4 seguiu a metodologia de tratamento dos anteriores, passando pelo Jar Test, promovida a agitação em altas rotações com gradiente de  $800\ s^{-1}$ , posteriormente adicionando nos jarros o sulfato de alumínio junto com o lodo acidificado, nas seguintes concentrações: lodo acidificado + 30 mg/L sulfato, lodo acidificado + 40 mg/L sulfato e no último jarro, lodo acidificado + 50 mg/L sulfato.

Sendo assim pode-se observar que nos grupos 1 e 3 o tratamento foi feito somente utilizando o coagulante sulfato de alumínio, já no grupo 2 e 4 foi feito utilizando lodo residual dos tratamentos anteriores combinado com o sulfato de alumínio, sendo no grupo 4 exclusivamente o uso de lodo acidificado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. DESEMPENHO

Nas tabelas 4, 5, 6 e 7 são os valores obtidos da caracterização da amostra bruta.

**Tabela 4 – Caracterização da água bruta referente ao grupo 1.**

GRUPO 1		
AMOSTRA BRUTA		
	TURBIDEZ	pH
	275	5,7
	276	5,73
	285	5,76
MÉDIA	278,7	5,73

**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 5 – Caracterização da água bruta referente ao grupo 2.**

GRUPO 2		
AMOSTRA BRUTA		
	TURBIDEZ	pH
	275	5,7
	276	5,73
	285	5,76
MÉDIA	278,7	5,73

**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 6 – Caracterização da água bruta referente ao grupo 3.**

GRUPO 3		
AMOSTRA BRUTA		
	TURBIDEZ	pH
	331	5,49
	325	5,55
	328	5,53
MÉDIA	328,0	5,52

**Fonte: Autoria própria.**

Tabela 7 – Caracterização da água bruta referente ao grupo 4.

GRUPO 4		
AMOSTRA BRUTA		
	TURBIDEZ	pH
	275	5,7
	276	5,73
	285	5,76
MÉDIA	278,7	5,73

Fonte: Autoria própria.

Os valores nas tabelas 8, 9, 10 e 11 foram obtidos após o tratamento da água residuária referente aos 4 grupos.

Tabela 8 – Valores obtidos no tratamento do grupo 1.

GRUPO 1							
AMOSTRA	CONCENTRAÇÃO (mg/L)	pH CORRIGIDO	MÉDIA TURB.	MÉDIA pH	VOLUME LODO (mL)	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (NTU)	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (%)
1	60	5	38,9	5,94	35	239,8	86,04%
2	80	5	33,4	5,66	39	245,2	88,00%
3	100	5	32,4	5,42	36	246,2	88,36%
4	60	7	79,0	7,08	-	199,7	71,66%
5	80	7	38,4	7,13	28,5	240,3	86,23%
6	100	7	13,8	7,08	86	264,9	95,06%
7	60	9	88,7	6,85	-	190,0	68,18%
8	80	9	74,5	6,97	3	204,1	73,25%
9	100	9	63,2	7,16	9	215,4	77,31%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 – Valores obtidos no tratamento do grupo 2.

GRUPO 2							
AMOSTRA	CONCENTRAÇÃO (mg/L)	pH CORRIGIDO	MÉDIA TURB.	MÉDIA pH	VOLUME LODO (mL)	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (NTU)	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (%)
10	30 + L	5	41,8	5,47	57	236,83	84,99%
11	40 + L	5	38,7	5,33	60	240,00	86,12%
12	50 + L	5	37,0	5,10	61	241,63	86,71%
13	30 + L	7	99,6	6,88	3	179,10	64,27%
14	40 + L	7	91,0	6,77	21	187,67	67,34%
15	50 + L	7	60,3	6,66	61	218,40	78,37%
16	30 + L	9	87,5	7,47	2	191,20	68,61%
17	40 + L	9	87,0	7,38	5	191,63	68,77%
18	50 + L	9	64,2	7,24	32	214,50	76,97%

Fonte: Aatoria própria.

Tabela 10 – Valores obtidos no tratamento do grupo 3.

GRUPO 3							
AMOSTRA	CONCENTRAÇÃO (mg/L)	pH CORRIGIDO	MÉDIA TURB.	MÉDIA pH	VOLUME LODO (mL)	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (NTU)	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (%)
19	60	5	17,4	5,07	68	310,63	94,71%
20	80	5	8,8	4,91	110	319,19	97,31%
21	100	5	8,9	4,86	115	319,11	97,29%
22	60	7	64,6	6,29	58	263,43	80,32%
23	80	7	28,3	6,64	86	299,73	91,38%
24	100	7	11,9	6,44	110	316,07	96,36%
25	60	9	131,0	7,54	18	197,00	60,06%
26	80	9	106,3	7,48	33	221,67	67,58%
27	100	9	86,5	7,70	43	241,50	73,63%

Fonte: Aatoria própria.

Tabela 11 – Valores obtidos no tratamento do grupo 4.

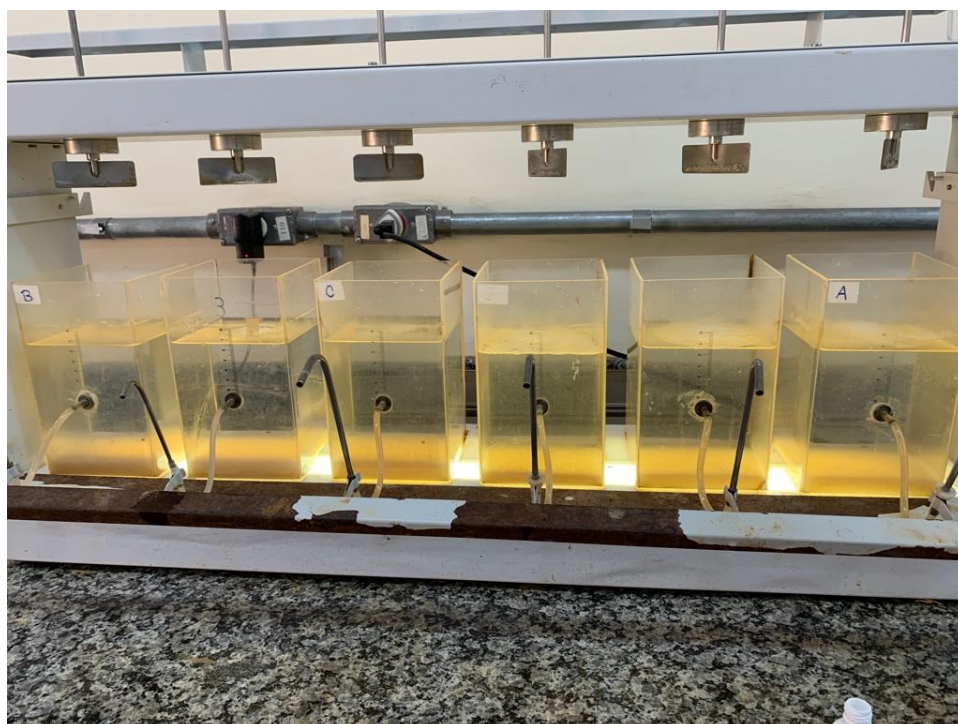
GRUPO 4							
AMOSTRA	CONCENTRAÇÃO (mg/L)	pH CORRIGIDO	MÉDIA TURB.	MÉDIA pH	VOLUME LODO (mL)	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (NTU)	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (%)
28	30 + LA	5	32,6	5,54	100	246,10	88,31%
29	40 + LA	5	26,6	5,40	120	252,03	90,44%
30	50 + LA	5	25,8	5,27	125	252,90	90,75%
31	30 + LA	7	31,9	6,33	110	246,73	88,54%
32	40 + LA	7	17,4	6,24	150	261,23	93,74%
33	50 + LA	7	15,4	6,24	165	263,23	94,46%
34	30 + LA	9	83,2	7,02	45	195,47	70,14%
35	40 + LA	9	51,1	6,97	80	227,60	81,67%
36	50 + LA	9	27,2	6,34	110	251,43	90,23%

Fonte: Autoria própria.

Devido ao fato de termos duas amostras diferentes, as comparações dos resultados obtidos serão feitas apenas entre o grupo 1 com o grupo 2 e o grupo 3 com o grupo 4. A fim de avaliar a eficácia do lodo como auxiliar de coagulação, seja ele acidificado ou não.

O coagulante sulfato de alumínio nos tratamentos dos grupos 1 e 3, assim como a combinação do coagulante com o lodo e o lodo acidificado (grupos 3 e 4) apresentaram resultados satisfatórios segundo (LUFT et al., 2018), pois os mesmos possibilitaram a formação de floco e conseqüentemente separação de fases em diferentes faixas de pH e concentrações diferentes, conforme a Figura 9, com eficiência média no grupo 1 de 81,56%, no grupo 2 eficiência de 75,79%, no grupo 3 eficiência de 84,29% e no grupo 4 eficiência média de 87,58%.

**Figura 9 - Amostras após a sedimentação.**



**Fonte: Autoria própria.**

## **5.2. REMOÇÃO DE TURBIDEZ**

Como pode-se observar na tabela 4, os valores obtidos no tratamento do grupo 1 referente a turbidez, os dois valores mais expressivos em termos de redução de turbidez ocorreram nas amostras 3 e 6, onde respectivamente correspondem ao pH corrigido de 5 e 7 e com concentração de 100 mg/L em ambas, correspondendo a 88,36% e 95,06 % de remoção de turbidez.

Na tabela 5 observa-se os valores do tratamento do grupo 2, onde as análises 11 e 12 tiveram o melhor desempenho em termos de redução de turbidez, em ambos os casos o valor de pH corrigido foi de 5 e dosagem de sulfato de alumínio foram nas concentrações de 40 mg/L + lodo e 50 mg/L + lodo respectivamente, 86,12% de remoção e 86,71% de remoção de turbidez.

No grupo 3 destaca-se 3 valores muito próximos quando comparado a redução de turbidez, que são as amostras 20, 21 e 24, que por sua vez também são os maiores valores de remoção de turbidez de todos os 4 grupos. Sendo as amostras 20 e 21 com pH 5 e a amostra 24 no pH 7, respectivamente as concentrações são 80, 100 e 100 mg/L de sulfato de alumínio, com valores de remoção de 97,31%, 97,29% e 96,36%



Já no grupo 4 os maiores valores ocorreram nas amostras 32 e 33, com pH 7, ambos e com concentrações de 40 mg/L + lodo e 50 mg/L + lodo, tendo 93,74% e 94,46% de remoção de turbidez.

Analisando os resultados de remoção de turbidez dos 4 grupos, fica evidente uma característica em comum às 36 amostras, que as menores concentrações de coagulante não são tão eficientes quanto as concentrações intermediárias ou mais altas utilizadas nesse trabalho, visto que em todos os grupos os valores de destaque das remoções de turbidez encontram-se nas concentrações de 80 mg/L de sulfato de alumínio (intermediária) ou pela variação do uso do lodo, 40 mg/L + lodo, ou então nas concentrações de 100 mg/L de sulfato de alumínio (alta) ou a variação com lodo de 50 mg/L + lodo.

Nos maiores valores de geração de lodo é onde conseqüentemente encontra-se os menores valores de turbidez, haja visto que a matéria orgânica anteriormente suspensa e dispersa no meio líquido era o principal causador do aumento da turbidez. Com isso fica evidenciado a eficiência do coagulante, cumprindo o objetivo esperado quando proposto inicialmente que fizesse a remoção da matéria orgânica através do mecanismo de varredura

Analisando a remoção de turbidez dos 4 grupos pode-se comparar os resultados obtidos com o que foi demonstrado por (DOVLETOGLOU; PHILIPPOPOULOS; GRIGOROPOULOU, 2002), onde esperava-se resultados de remoção de turbidez entre 90% até 99% como foi destacado anteriormente com os maiores valores de cada um dos quatro grupos.

### 5.2.1. REMOÇÃO DE TURBIDEZ – GRUPO 1 E 2

As comparações são feitas de tal modo que as amostras possuam o mesmo pH de correção e a mesma concentração de coagulação, diferindo apenas pelo uso do lodo, sendo o a amostra 1 comparada com a amostra 10, a amostra 1 corresponde ao grupo 1 com pH 5 e concentração de 60 mg/L de sulfato de alumínio, já a amostra 10 corresponde ao grupo 2 com pH 5 e concentração de 30 mg/L de sulfato de alumínio + lodo do tratamento residual da amostra 1, sucessivamente, a amostra 2 comparada com a amostra 11 e assim por diante, até a amostra 27 comparada com a 36.

Ao compararmos o grupo 1 com o grupo 2 em termos de redução de turbidez obteve-se a seguintes tabelas para os valores de amostra com pH 5, 7 e 9 respectivamente:

Na tabela 12 são os valores referentes a remoção de turbidez entre o grupo 1 e 2, com concentrações de sulfato de alumínio 60 mg/L, 80 mg/L e 100 mg/L no grupo 1 e 30 mg/L + lodo, 40 mg/L + lodo e 50 mg/L + lodo no grupo 2 e pH da amostra igual a 5.

**Tabela 12 – Comparação grupo 1 e 2 pH 5 e diferentes concentrações.**

<b>AMOSTRA</b>	<b>REDUÇÃO DE TURBIDEZ (%)</b>	<b>DIFERENÇA DE REDUÇÃO (%)</b>
1	86,04	1,05
10	84,99	
2	88,00	1,88
11	86,12	
3	88,36	1,65
12	86,71	

**Fonte: Autoria própria.**

Na tabela 13 são os valores referentes a remoção de turbidez entre o grupo 1 e 2, com concentrações de sulfato de alumínio 60 mg/L, 80 mg/L e 100 mg/L no grupo 1 e 30 mg/L + lodo, 40 mg/L + lodo e 50 mg/L + lodo no grupo 2 e pH das amostras 7.

Tabela 13 – Comparação grupo 1 e 2 pH 7 e diferentes concentrações.

AMOSTRA	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (%)	DIFERENÇA DE REDUÇÃO (%)
4	71,66	7,39
13	64,27	
5	86,23	18,89
14	67,34	
6	95,06	16,69
15	78,37	

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 14 são os valores referentes a remoção de turbidez entre o grupo 1 e 2, com concentrações de sulfato de alumínio 60 mg/L, 80 mg/L e 100 mg/L no grupo 1 e 30 mg/L + lodo, 40 mg/L + lodo e 50 mg/L + lodo no grupo 2 e pH das amostras 9.

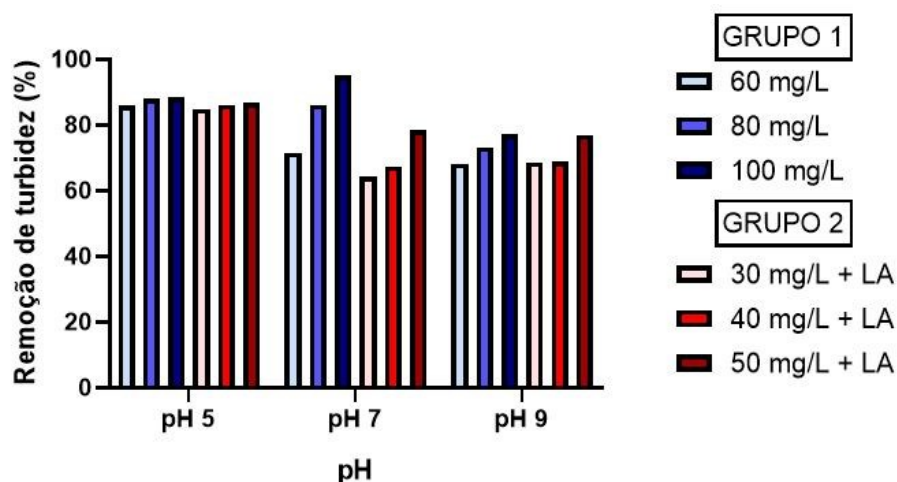
Tabela 14 – Comparação grupo 1 e 2 pH 9 e diferentes concentrações.

AMOSTRA	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (%)	DIFERENÇA DE REDUÇÃO (%)
7	68,18	-0,43
16	68,61	
8	73,25	4,48
17	68,77	
9	77,31	0,34
18	76,97	

Fonte: Autoria própria.

Resumidamente as comparações encontram-se na Figura 10, comparando-os lado a lado em barras fica evidente que a diferença de tratamentos não foi tão expressiva, evidenciando a eficácia do lodo no tratamento como auxiliar de coagulação.

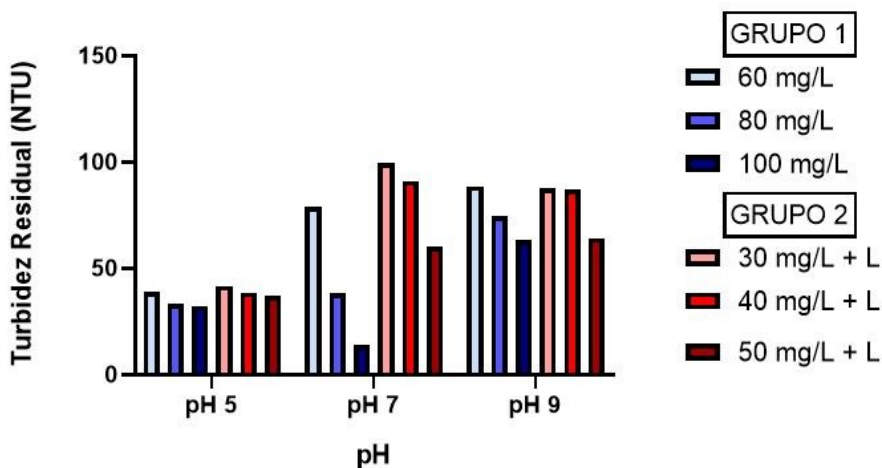
Figura 10 - Performance de remoção entre o grupo 1 e o grupo 2.



Fonte: Autoria própria.

A figura 11 a seguir observa-se a comparação dos resultados do tratamento do grupo 1 com o grupo 2. No grupo 1 as barras são as de cores sólidas, já o grupo 2 são as barras de cores quadriculadas.

Figura 11 - Turbidez residual do grupo 1 comparado com o grupo 2.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que de modo geral a diferença de turbidez não teve um valor expressivo quando comparado os dois grupos, das 9 comparações feitas, o grupo 1 que é referente ao tratamento apenas com o coagulante possui 8 valores com melhores resultados de remoção e o grupo 2 apenas 1 valor.

Ao analisar o gráfico fica evidente que por mais que o grupo 1 possua 8 valores de remoção melhores quando comparado ao grupo 2, a variação entre esses valores

não é tão expressiva, ao modo que pode-se dizer que o grupo 2 praticamente acompanhou os valores obtidos no grupo 1.

É válido ressaltar que o lodo é um produto originado a partir do tratamento da água residuária e obter tais valores com o seu emprego no tratamento, mostra o quanto o lodo é eficiente no tratamento auxiliando o coagulante e cumprindo o objetivo inicialmente proposto. Haja visto que os valores obtidos no grupo 1 foram próximos dos valores obtidos no grupo 2.

Assim como analisado por (MATOS et al., 2007), esperava-se que a faixa de pH de maior remoção de turbidez fosse entre 7,0 e 8,0, analisando os grupos 1 e 2 pode-se observar que o melhor valor de remoção de turbidez encontra-se na amostra número 6 de pH 7,0 do grupo 1.

### **5.2.2. REMOÇÃO DE TURBIDEZ – GRUPO 3 E 4**

Nesse tópico compara-se os valores obtidos no tratamento feito apenas com o coagulante sulfato de alumínio (grupo 3) com os valores obtidos no tratamento com o lodo acidificado auxiliando o coagulante sulfato de alumínio (grupo 4).

Assim como foi feito no tópico anterior, as comparações se deram de modo que comparassem entre os grupos as amostras que tiveram o seu pH e a concentração equivalentes, sendo eles a amostra 19 (primeira amostra do grupo 3) comparada com a amostra 28 (primeira amostra do grupo 4) e assim seguindo até a amostra 27 sendo comparada com a 36, as duas últimas dos dois grupos.

Na tabela 15 são apresentados os valores referentes a remoção de turbidez entre o grupo 3 e 4, com concentrações de sulfato de alumínio 60 mg/L, 80 mg/L e 100 mg/L no grupo 3 e 30 mg/L + lodo acidificado, 40 mg/L + lodo acidificado e 50 mg/L + lodo acidificado no grupo 4 e pH das amostras 5.

Tabela 15 – Comparação grupo 3 e 4 pH 5 e diferentes concentrações.

AMOSTRA	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (%)	DIFERENÇA DE REDUÇÃO (%)
19	94,71	6,4
28	88,31	
20	97,31	6,87
29	90,44	
21	97,29	6,54
30	90,75	

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 16 são os valores referentes a remoção de turbidez entre o grupo 3 e 4, com concentrações de sulfato de alumínio 60 mg/L, 80 mg/L e 100 mg/L no grupo 3 e 30 mg/L + lodo acidificado, 40 mg/L + lodo acidificado e 50 mg/L + lodo acidificado no grupo 4 e pH das amostras 7.

Tabela 16 – Comparação grupo 3 e 4 pH 7 e diferentes concentrações.

AMOSTRA	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (%)	DIFERENÇA DE REDUÇÃO (%)
22	80,32	-8,22
31	88,54	
23	91,38	-2,36
32	93,74	
24	96,36	1,9
33	94,46	

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 17 são apresentados os valores referentes a remoção de turbidez entre o grupo 3 e 4, com concentrações de sulfato de alumínio 60 mg/L, 80 mg/L e 100 mg/L no grupo 3 e 30 mg/L + lodo acidificado, 40 mg/L + lodo acidificado e 50 mg/L + lodo acidificado no grupo 4 e pH das amostras 9.

Tabela 17 – Comparação grupo 3 e 4 pH 9 e diferentes concentrações.

AMOSTRA	REDUÇÃO DE TURBIDEZ (%)	DIFERENÇA DE REDUÇÃO (%)
25	60,06	-10,08
34	70,14	
26	67,58	-14,09
35	81,67	
27	73,36	-16,87
36	90,23	

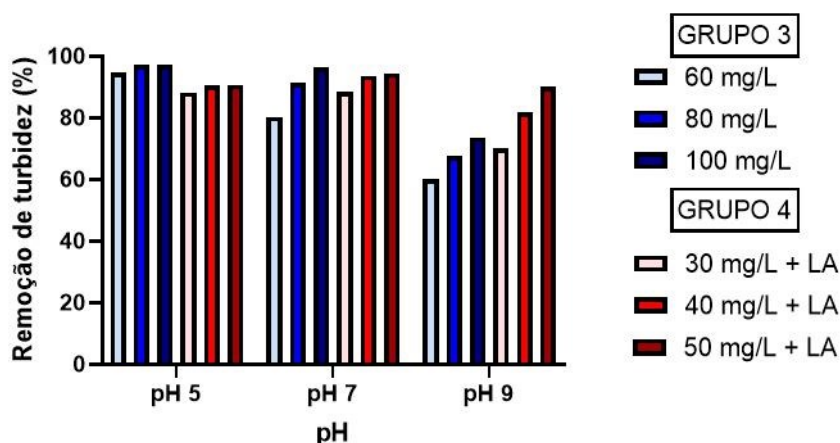
Fonte: Autoria própria.

De modo geral os valores obtidos no tratamento com o lodo acidificado tiveram melhores valores de remoção de turbidez, das 9 comparações em 5 delas foram verificadas as melhores remoções com o lodo acidificado.

Por outro lado, pode-se observar as amostras 24 e 33 com valores de remoção próximo de 95%, nas quais o pH após a mistura foi de 6,44 e 6,24 e concentrações de 100 mg/L de sulfato de alumínio e 50 mg/L de sulfato + lodo acidificado respectivamente, que quando analisado com a figura 2 do diagrama de coagulação de Amirtharajah e Mills encontramos os parâmetros referentes a área de varredura ótima, tanto para o pH quanto para os valores de concentração do sulfato de alumínio.

Na Figura 12 temos a comparação dos valores de remoção de turbidez (%) de cada grupo, comparado lado a lado.

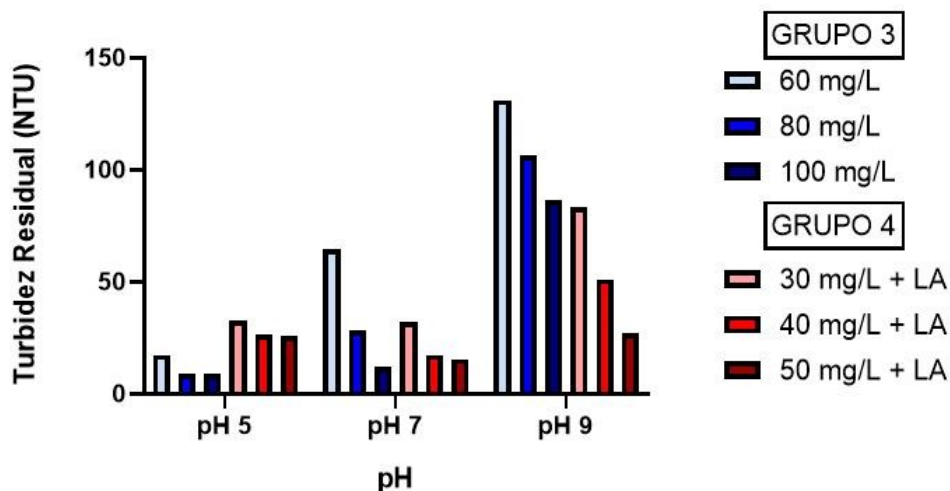
Figura 12 - Performance de remoção entre o grupo 3 e o grupo 4.



Fonte: Autoria própria.

A figura 13 4 mostra a comparação dos valores de turbidez obtidos em cada grupo, fica evidente a diferença de lodo gerado em cada tratamento.

Figura 13 - Turbidez residual do grupo 3 comparado com o grupo 4.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que os valores obtidos do tratamento dos grupos 3 e 4 com remoção de turbidez de praticamente todas as faixas de pH testadas acima ou próximo de 90%, conforme era esperado por (PEDRETTI, 2022) evidenciando a eficácia do tratamento.

### 5.3. LODO GERADO

Na tabela 18, assim como na Figura 14, referente ao tratamento do grupo 1 e grupo 2, observa-se que as amostras que possuem concentrações de 60 mg/L ou 30 mg/L + lodo quando combinadas com o pH 7 e 9 possuem os menores valores de geração de lodo (mL/L).

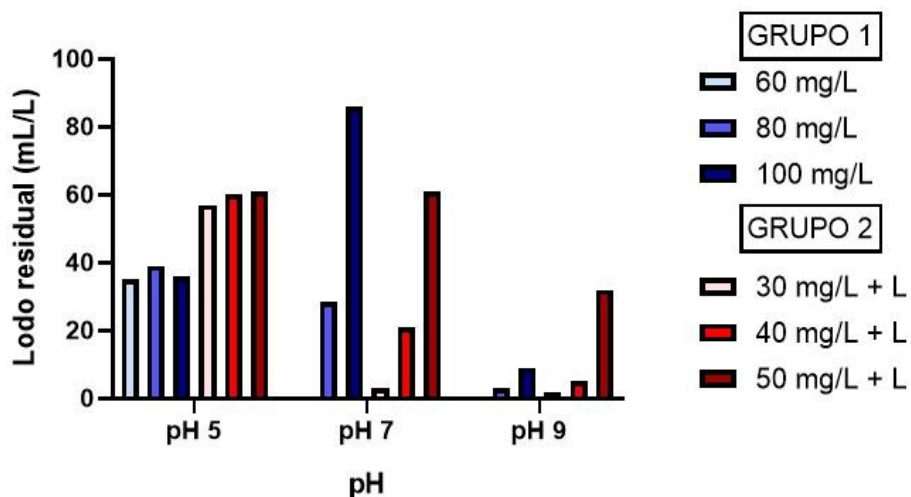
Tabela 18 – Lodo gerado no tratamento dos grupos 1 e 2.

	GRUPO 1			GRUPO 2		
	pH 5	pH 7	pH 9	pH 5 (L)	pH 7 (L)	pH 9 (L)
60 ou 30+L	35	0	0	57	3	2
80 ou 40+L	39	28,5	3	60	21	5
100 ou 50+L	36	86	9	61	61	32

Fonte: Autoria própria.



Figura 14 – Geração de lodo do grupo 1 e 2, lado a lado.



Fonte: Autoria própria.

Na tabela 19 encontram-se os valores obtidos pela geração de lodo (mL/L) através do tratamento dos grupos 3 e 4.

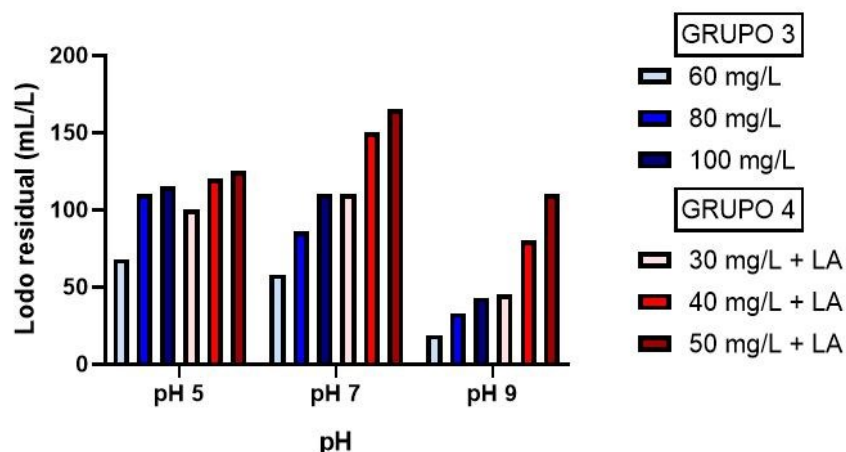
Tabela 19 – Lodo gerado no tratamento dos grupos 3 e 4.

	GRUPO 3			GRUPO 4		
	pH 5	pH 7	pH 9	pH 5 (LA)	pH 7 (LA)	pH 9 (LA)
60 ou 30+LA	68	58	18	100	110	45
80 ou 40+LA	110	86	33	120	150	80
100 ou 50+LA	115	110	43	125	165	110

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 15, consegue-se observar de modo geral como foi a geração de lodo no tratamento referente aos grupos 3 e 4, bem como um comparativo entre eles.

Figura 15 – Geração de lodo do grupo 3 e 4, lado a lado.



Fonte: Autoria própria.

Os valores de lodo gerado podem ser explicados através do estudo de (ABOULHASSAN et al., 2006), onde diz que a quantidade de lodo gerado durante a coagulação e floculação depende especificamente do tipo de coagulante que está sendo utilizado, visto que a adição de auxiliares de coagulação tal como o polieletrólito, diminui a geração de lodo, porém o uso apenas do coagulante faz com que os valores aumentem, portanto nesse caso que a comparação se deu entre os valores obtidos de um tratamento apenas com coagulante e outro tratamento de coagulante + lodo, o resultado era esperado que houvesse maior geração de lodo no tratamento dos grupos 2 e 4.

Destaca-se a maior geração de lodo entre os grupos 1 e 2 a amostra de número 6, que resultou em 86 mL/L de lodo gerado, onde coincidentemente teve o melhor valor de remoção de turbidez (95,06%). Na amostra dos grupos 3 e 4 destaca-se a de número 33 que gerou 165 mL/L de lodo e também com um dos maiores valores de remoção de turbidez (94,46%). De acordo (CHIARAMONTE, 2020) o método de recuperação de coagulante por via ácida é eficiente, principalmente para remoção de turbidez, porém tem como característica a geração de lodo, onde fica evidente que nas amostras onde obteve-se a maior remoção de turbidez, consequentemente obteve-se a maior geração de lodo.

#### 5.4. ALUMÍNIO RESIDUAL

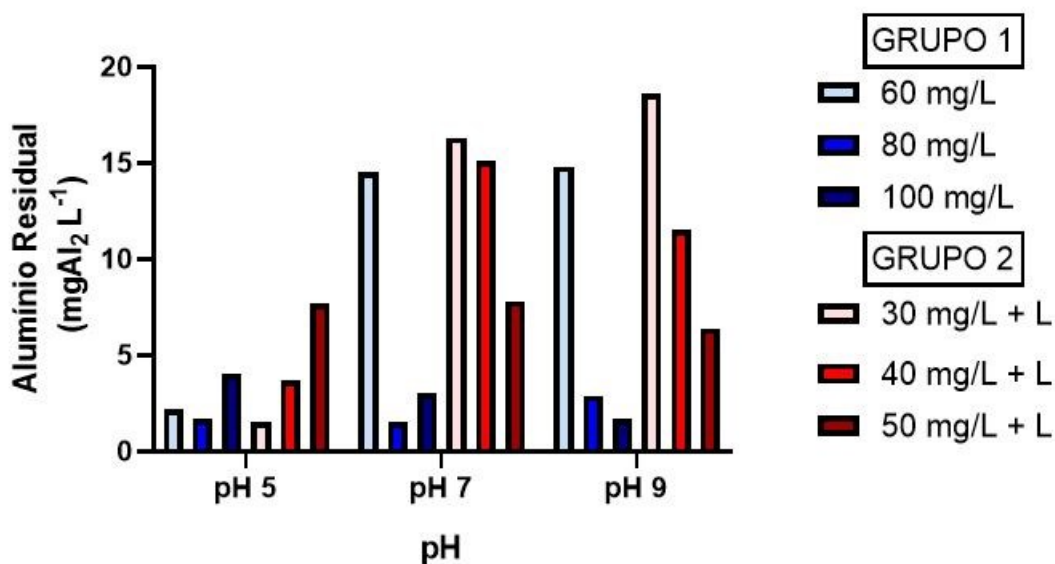
Na tabela 20 encontram-se os valores obtidos de alumínio residual (mg/L) referente ao tratamento dos grupos 1 e 2.

**Tabela 20 – Valores obtidos de alumínio residual do tratamento do grupo 1 e 2.**

CONCENTRAÇÃO	GRUPO 1			GRUPO 2		
	pH 5	pH 7	pH 9	pH 5 + L	pH 7 + L	pH 9 + L
60 ou 30+L	2,2	14,5	14,8	1,5	16,3	18,6
80 ou 40+L	1,7	1,5	2,9	3,7	15,1	11,5
100 ou 50+L	4,0	3,0	1,7	7,7	7,8	6,4

Fonte: Autoria própria.

Na figura 16 observa-se o comparativo dos valores de alumínio residual referente ao tratamento dos grupos 1 e 2.

**Figura 16 – Alumínio residual do grupo 1 e 2, lado a lado.**

Fonte: Autoria própria.

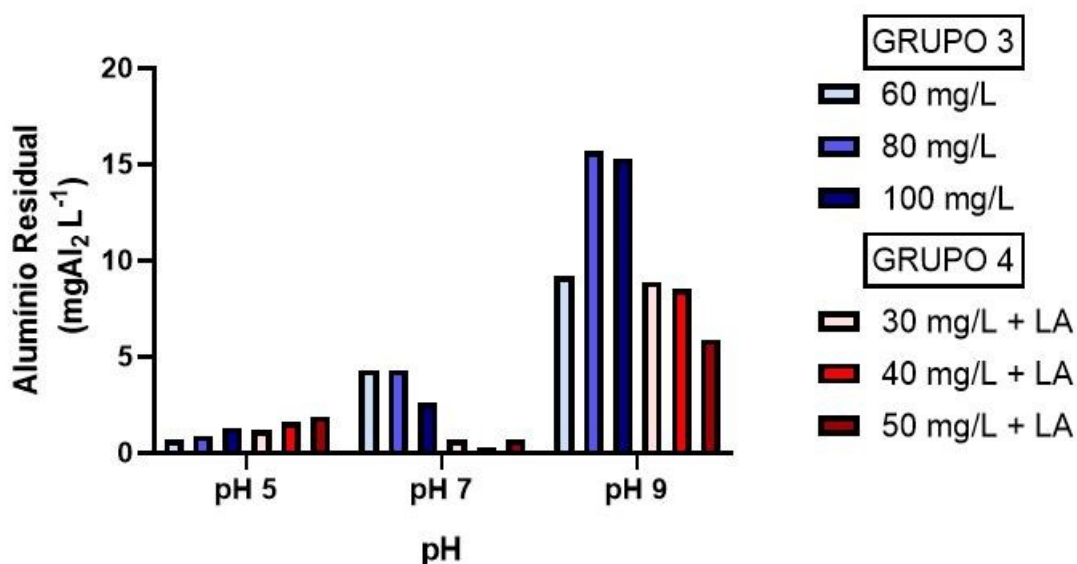
Na tabela 21 e na figura 17 encontram-se os valores de alumínio residual referente ao tratamento dos grupos 3 e 4.

**Tabela 21 – Valores obtidos de alumínio residual do tratamento do grupo 3 e 4.**

CONCENTRAÇÃO	GRUPO 3			GRUPO 4		
	pH 5	pH 7	pH 9	pH 5 + LA	pH 7 + LA	pH 9 + LA
60 ou 30+LA	0,7	4,3	9,2	1,2	0,7	8,9
80 ou 40+LA	0,9	4,3	15,7	1,6	0,3	8,5
100 ou 50+LA	1,3	2,6	15,3	1,9	0,4	5,9

Fonte: Autoria própria.

Figura 17 – Alumínio residual do grupo 3 e 4, lado a lado.



Fonte: Autoria própria.

Assim como analisado por (GUIMARÃES, 2005), espera-se que nos maiores valores de recuperação de coagulante, tenha-se os menores valores de geração de lodo. Tal fator pode ser comprovado ao observarmos a amostra 16 (pH 7 e concentração de coagulante de 30 mg/L + L) do grupo 2, onde a geração de lodo do mesmo foi de 2 mL/L, sendo uma das menores gerações de lodo de todo o comparativo grupo 1 e 2 (ver Figura 16).

Em contrapartida ao analisarmos o grupo 3 e 4, temos as amostras de número 32 e 33 (pH 7 e concentração de 40 mg/L + LA e 50 mg/L + LA) onde pode-se observar na Figura 17 que as mesmas correspondem aos menores valores de geração de alumínio residual do comparativo dos grupos 3 e 4 e conseqüentemente foram os maiores valores de geração de lodo residual, tendo valores de 150 mL/L e 165 mL/L respectivamente.

Nos valores de pH 7, quando utilizado apenas o sulfato de alumínio (grupos 1 e 3) obteve-se valores de alumínio residual conforme apresentado na tabela 18.

**Tabela 22 – Porcentagens de alumínio residual nas amostras de tratamento com  $Al_2(SO_4)_3$  apenas.**

	GRUPO 1			GRUPO 3		
AMOSTRA	4	5	6	22	23	24
ALUMÍNIO RESIDUAL (%)	24,17%	1,87%	3%	7,17%	5,38%	2,60%

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que com exceção da amostra número 4 que não houve geração de lodo e conseqüentemente esperava-se que tivesse maior geração de alumínio residual conforme anteriormente citado e estudado por (GUIMARÃES, 2005), porém para os demais valores possuem uma certa proximidade entre eles, o que era esperado conforme analisado por (LEITE; HOFFMANN; DANIEL, 2019) onde obtiveram em seu estudo utilizando o  $Al_2(SO_4)_3$  500 mg/L um valor de alumínio residual de 32 mg/L, representando 6,4% de alumínio.

Entretanto, nos valores obtidos para o grupo 4 (coagulante + LA) observa-se que os valores são menores quando comparados ao grupo 1, o que pode ser explicado por (PEDRETTI ANGELA, 2020) onde o lodo quando tratado por via ácida na faixa de pH 2,0 o mesmo não apresentou uma lixiviação seletiva, lixiviando juntamente com o sulfato de alumínio demais metais, fazendo com que os valores de alumínio residual do grupo 4 sejam menores que o grupo 3, o que explica também a diferença do grupo 2 (coagulante + lodo) que não teve o lodo de seu tratamento recuperado por via ácida e sim *in natura*, quando comparado ao grupo 1 que possui valores de alumínio residual próximos aos valores do grupo 2.

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que o presente estudo alcançou os objetivos inicialmente propostos, demonstrando através dos valores médios de cada grupo para o desempenho de remoção de turbidez, variando de 81,56%, 75,79%, 84,29% e 87,58% em cada um dos quatro grupos respectivamente, alcançando a remoção pontual de cada grupo sendo os melhores valores de remoção de 95,06% de com pH 7 e concentração 100 mg/L para o grupo 1, com pH 5 e concentração 50 mg/L + lodo – 86,71% de remoção para o grupo 2, com pH 5 e concentração 100 mg/L – 97,31% de remoção para o grupo 3 e por fim pH 7 e concentração 50 mg/L + lodo acidificado – 94,46% de remoção para o grupo 4 mostrando que a diferença entre o tratamento com o lodo como auxiliar de coagulação é sim eficiente e a acidificação do lodo também foi eficiente quando comparada com o tratamento com o sulfato de alumínio.

Sendo a geração de lodo com valores esperados de acordo com a literatura, variando de 0 mL/L (pH 7 e pH 9 com concentrações de 60 mg/L de sulfato) até 165 mL/L (pH 7 com concentração de 50 mg/L combinado com LA) de lodo gerado, mostrando assim uma alternativa para o reuso do lodo como auxiliar de coagulação.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOULHASSAN, M. A. et al. Improvement of paint effluents coagulation using natural and synthetic coagulant aids. **Journal of Hazardous Materials**, v. 138, n. 1, p. 40–45, 2006.

AHMAD, T. et al. Characterization of water treatment sludge and its reuse as coagulant. **Journal of Environmental Management**, v. 182, n. August, p. 606–611, 2016.

ANDREOLI, C. V. et al. Uso E Manejo Do Lodo De Esgoto Na Agricultura. **Companhia de Saneamento do Paraná Programa de Pesquisa em Saneamento Básico**, p. 98, 1999.

ARRUDA, C. et al. Pós-tratamento de efluente cervejeiro com coagulantes naturais. v. 10, n. 4, 2015.

CARDOSO, Marcio. Efeito do tipo de coagulante na produção de lodo de estação de tratamento de água. 2002. 109f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)** – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CHIARAMONTE, R. C. Estudo da viabilidade da recuperação do coagulante sulfato de alumínio em lodo de estação de tratamento de água (LETA). 2020.

DANTAS, A.; DI BERNARDO, L.; VOLTAN, P. E. N. Controle Básico de ETAs I – Coagulação: nível 2. **Angewandte Chemie International Edition**, 6(11), 951–952., v. 2, n. 1, p. 180, 2008.

DOVLETOGLOU, O.; PHILIPPOPOULOS, C.; GRIGOROPOULOU, H. Coagulation for treatment of paint industry wastewater. **Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering**, v. 37, n. 7, p. 1361–1377, 2002.

ENITAN, A. M. et al. Characterization of brewery wastewater composition. **International Journal of Environmental and Ecological Engineering**, v. 9, n. 9, p.

1073–1076, 2015.

FORTINO, P. Pós-tratamento de efluente têxtil usando coagulação, floculação combinado com processos de separação por membranas. 2012.

GUIMARÃES, N. C. Recuperação de Coagulante a partir da Acidificação de Resíduos Gerados na Estação de Tratamento de Água do Rio Manso. p. 124, 2005.

HUANG, H.; SCHWAB, K.; JACANGELO, J. G. Pretreatment for low pressure membranes in water treatment: A review. **Environmental Science and Technology**, v. 43, n. 9, p. 3011–3019, 2009.

JANZ, F. J. L. et al. Comparação entre coagulantes orgânicos e sulfato de alumínio no pós tratamento do efluente de industria cervejeira. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 25857–25864, 2020.

JULIO, M. DE; ENGENHARIA, D. DE. Regeneração Por Via Ácida Do Coagulante Água Pitangui Operada Pela Sanepar De Ponta Grossa / Pr Acid Via Regeneration of the Coagulant Present in the Sludge of Pitangui Water Treatment Plant Managed By Sanepar From Ponta Grossa / Pr / Brazil. n. 2009, p. 14–27, [s.d.].

KONRADT-MORAES, L. C. Estudo dos processos de coagulação e floculação seguidos de filtração com membranas para a obtenção de água potável. p. 205, 2009.

LAZZARI, J. Análise do potencial energético de lodos obtidos no tratamento de esgoto. p. 83, 2018.

LEITE, L. DE S.; HOFFMANN, M. T.; DANIEL, L. A. Coagulation and dissolved air flotation as a harvesting method for microalgae cultivated in wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, v. 32, n. August, p. 100947, 2019.

LUFT, J. et al. Tratamento Físico-Químico De Efluentes Gerados Na Proteção Superficial De Aço Carbono Em Indústria De Peças Agrícolas E Automotivas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 540, 2018.

MAPA. **Anuário da cerveja 2020**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/com-crescimento-de-14-4-em-2020-numero-de-cervejarias->



registradas-no-brasil-passa-de-1-3-mil>.

MATOS, A. T. et al. Effects from the concentration of coagulants and pH solution on the turbidity of the recirculating water used in the coffee cherry processing. **Engenharia Agricola**, v. 27, n. 2, p. 544–551, 2007.

NOZELA, W. C. Caracterização do lodo de esgoto , após desaguamento e secagem térmica , da Estação de Tratamento de Esgoto de Araraquara / SP **Dissertação apresentada ao Instituto de Química , Universidade Estadual Paulista**, p. 0–90, 2014.

PEDRETTI, A. Avaliação do potencial de coagulante recuperado de lodo de estação de tratamento de água para uso em águas de baixa e elevada turbidez. 2022.

PEDRETTI ANGELA, M. C. R. Caracterização e recuperação de coagulante sulfato de alumínio em lodo proveniente de Estação de Tratamento de Água. p. 4–9, 2020.

SUSTENT, C. et al. 9º **FÓRUM INTERNACIONAL ECOINOVAR Santa Maria/RS** - 17, 18 e 19 de Novembro de 2020. p. 4–9, 2020.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES. R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. V.; FERNDANDES. F. (Ed.). **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final. Princípio do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2001. cap. 2, p. 17-67.