

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE -UNICENTRO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA
SANITÁRIA E AMBIENTAL, ASSOCIAÇÃO AMPLA ENTRE UNICENTRO E
UEPG

ELAINE GOLINSKI

TRATAMENTO DE ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTRO POR SEDIMENTAÇÃO
SIMPLES E ASSISTIDA POR COAGULANTE RECUPERADO DE LODO DE
DECANTADOR DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.

IRATI - PR
2023

ELAINE GOLINSKI

TRATAMENTO DE ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTRO POR SEDIMENTAÇÃO
SIMPLES E ASSISTIDA POR COAGULANTE RECUPERADO DE LODO DE
DECANTADOR DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, área de concentração em Tratamento de Água de Abastecimento e Águas Residuárias, da Universidade Estadual do Centro-Oeste-UNICENTRO.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Magno de Sousa Vidal
Coorientadora: Prof. Dra. Kelly Geronazzo Martins

IRATI - PR
2023

Catálogo na Publicação
Rede de Bibliotecas da UNICENTRO

G626t Golinski, Elaine
Tratamento de água de lavagem de filtro por sedimentação simples e assistida por coagulante recuperado de lodo de decantador de estação de tratamento de água / Elaine Golinski. -- Irati, 2023.
xv, 80 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Tratamento de Água de Abastecimento e Águas Residuárias, 2023.

Orientador: Carlos Magno de Sousa Vidal

Coorientadora: Kelly Geronazzo Martins

Banca examinadora: Carlos Magno de Sousa Vidal, Vanessa Daneluz Gonçalves, Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger

Bibliografia

1. Coagulação. 2. Lodo de decantador. 3. Água de lavagem de filtro. 4. Regeneração de lodo. 5. Coagulante recuperado. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

| CDD 628.4



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE - UNICENTRO
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação - PROPESP
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental
Associação ampla entre a UNICENTRO e UEPG



TERMO DE APROVAÇÃO

Elaine Golinski

Tratamento de água de lavagem de filtro por sedimentação simples e assistida por coagulante recuperado de lodo de decantador de Estação de Tratamento de Água

Dissertação aprovada em 3 de outubro de 2023, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Sanitária e Ambiental, área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:

Dr. Carlos Magno de Sousa Vidal

UNICENTRO - Orientador e Presidente da Banca

Dra. Vanessa Daneluz Gonçalves

UEM - Primeira Examinadora

Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger

UEPG - Segundo Examinador

Irati-PR, 3 de outubro de 2023.

www3.unicentro.br/ppgesa

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Sanitária e Ambiental – PPGESA/UNICENTRO – Campus de Irati-PR
Rua Profª Maria Rosa Zanon de Almeida, Bairro Engenheiro Gutierrez - CEP: 84.505-677 - Irati/PR – (42) 3421-3017

Correspondência Interna 011/2023. Assinatura Avançada realizada por: **Vanessa Daneluz Gonçalves (XXX.500.859-XX)** em 03/10/2023 17:13 Local: UEM/CTC/DAM, **Carlos Magno de Sousa Vidal (XXX.701.698-XX)** em 03/10/2023 19:39, **Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger (XXX.491.870-XX)** em 04/10/2023 11:53 Local: UEPG/SCATE. Inserido ao documento **652.239** por: **Joelma Fedalto Vitor Ferreira** em: 03/10/2023 16:48. Documento assinado nos termos do Art. 38 do Decreto Estadual nº 7304/2021. A autenticidade deste documento pode ser validada no endereço: <https://www.eprotocolo.pr.gov.br/spiweb/validarDocumento> com o código: **eab9962ecafb0508522c11b048a61393**.

AGRADECIMENTOS

Para começar, agradeço primeiramente a Deus por permitir estar viva após uma pandemia. Agradeço aos meus pais pelo apoio dado, pois sem eles não seria nada. Aos meus irmãos pela compreensão quando pedia para não falarem alto, pois as aulas no início eram virtuais. Ao meu noivo por todo apoio.

Agradeço ao meu eterno avô, pois cedeu seu carro para me deslocar até a Universidade, tanto para as aulas como para realizar os ensaios laboratoriais.

Ao pessoal do laboratório por todo ensinamento em especial a Karol e a Ana Charnei, que me auxiliaram nos primeiros dias e também ao Carlos Raphael que no final da pesquisa me auxiliou. A minha grande amiga Carol Manzatto, que juntas trabalhamos por alguns meses no laboratório de qualidade de água, além de me ajudar com a pesquisa, foram por vários dias.

Ao pessoal que conheci durante este tempo de pesquisa no laboratório e nas aulas, Jessica Chiafitela que no final ficamos muito próximas, e todo o pessoal que passou desde a Aline, Adriane, Amanda, Carlos, Leticia, Luan, Marcelo.

Aos professores meu agradecimento por todo conhecimento passado, principalmente para o professor Carlos Magno de Sousa Vidal, meu querido orientador, que me acolheu e acreditou em mim. A minha querida coorientadora Kelly Geronazzo Martins, que quando precisei de apoio na estatística estava sempre lá para me ajudar. E a nossa querida professora Tatiane Veiga, por toda ajuda que forneceu quando precisei. Agradeço também a Joelma por todas as dúvidas esclarecidas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Somos o que pensamos. Tudo o que somos surge com nossos pensamentos. Com nossos pensamentos fazemos o nosso mundo (BUDA).

RESUMO

No Brasil, a disposição inadequada do lodo proveniente das Estações de Tratamento de Água (ETA) representa um desafio ambiental significativo. Este estudo foca na recuperação de coagulantes do lodo do decantador, uma abordagem sustentável que pode reduzir impactos ambientais e otimizar recursos no tratamento de água. O objetivo principal deste trabalho foi investigar a eficácia da recuperação e reutilização de coagulantes a partir do lodo do decantador, visando a tratabilidade da água de lavagem de filtros em ETA. Utilizou-se um procedimento experimental em escala de bancada, incluindo testes de Jar-Test, para avaliar a recuperação de coagulantes sob diversas condições operacionais. Nesses ensaios utilizou-se amostras de água de lavagem de duas ETA diferentes. Os parâmetros analisados nesses experimentos foram a turbidez, a cor aparente e o pH. Além dos ensaios com o coagulante recuperado, foram também realizados experimentos com o coagulante comercial PAC para efeito comparativo. Por fim, foram realizados ensaios sem adição de coagulantes para verificar a eficiência somente da sedimentação no tratamento das águas de lavagem estudadas. Os resultados demonstraram que o coagulante recuperado foi eficaz na redução da turbidez da água de lavagem, alcançando valores residuais significativamente baixos nas melhores condições operacionais. Como exemplo, destaca-se turbidez residual de 9,3 uT na dosagem de 10 mgAl/L de coagulante recuperado no tempo de 15 minutos de sedimentação e 4,5 uT no tempo de 30 min para água de lavagem de Ponta Grossa. Para água de lavagem de Irati obteve-se turbidez residual de 6,1 uT no tempo de 15 minutos e 2,6 uT no tempo de 30 minutos. Conclui-se que a recuperação de coagulantes do lodo do decantador é uma estratégia viável e eficiente, oferecendo uma solução sustentável para o tratamento de água de lavagem em ETA, com potencial para recirculação segura ou até mesmo reúso.

PALAVRAS-CHAVES: Coagulação; Lodo de decantador; Água de lavagem de filtro; Regeneração de lodo; Coagulante recuperado.

ABSTRACT

In Brazil, the improper disposal of sludge from Water Treatment Plants (WTPs) poses a significant environmental challenge. This study focuses on the recovery of coagulants from decanter sludge, a sustainable approach that could reduce environmental impacts and optimize resources in water treatment. The primary objective of this work was to investigate the effectiveness of recovering and reusing coagulants from decanter sludge, aiming at the treatability of filter backwash water in WTPs. A bench-scale experimental procedure was used, including Jar-Test trials, to evaluate the coagulant recovery under various operational conditions. These tests used filter backwash water samples from two different WTPs. The parameters analyzed in these experiments were turbidity, apparent color, and pH. In addition to trials with the recovered coagulant, experiments were also conducted with the commercial coagulant PAC for comparative purposes. Finally, trials without coagulant addition were carried out to verify the efficiency of sedimentation alone in treating the studied filter backwash waters. The results demonstrated that the recovered coagulant was effective in reducing the turbidity of the filter backwash water, achieving significantly low residual values under the best operational conditions. For instance, a residual turbidity of 9.3 NTU was noted with a 10 mgAl/L dosage of the recovered coagulant after 15 minutes of sedimentation and 4.5 NTU after 30 minutes for the Ponta Grossa filter backwash water. For the Irati filter backwash water, a residual turbidity of 6.1 NTU was observed after 15 minutes and 2.6 NTU after 30 minutes. It is concluded that the recovery of coagulants from decanter sludge is a viable and efficient strategy, offering a sustainable solution for the treatment of backwash water in WTPs, with potential for safe recirculation or even reuse.

KEYWORDS: Coagulation; decanter sludge; filter backwash water; sludge regeneration; coagulant recovered.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Limpeza dos decantadores de uma Eta | 22 |
| Figura 2 – Fluxograma da concepção do tratamento dos resíduos das Eta..... | 22 |
| Figura 3 – Fluxograma das alternativas para tratamento de resíduos de Etas de filtração direta..... | 22 |
| 3 | |
| Figura 4– Alternativas de tratamentos de resíduos das Etas (Fonte: Adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan, 2012.) | 24 |
| Figura 5- Fluxograma do procedimento experimental | 32 |
| Figura 6– Esquema do sistema de tratamento de água ETA..... | 33 |
| Figura 7- Diagrama de fluxo da Estação de Tratamento de Água de Irati, localizada no estado do Paraná..... | 35 |
| Figura 8-Diagrama de fluxo da Estação de Tratamento de Água de Ponta Grossa, localizada no estado do Paraná. | 36 |
| Figura 9– Jar-test com o lodo para regeneração..... | 38 |
| Figura 10– Jar-test com o lodo recuperado..... | 39 |
| Figura 11– Análises microbiológicas de E.coli e CT..... | 42 |
| Figura 12– Análises microbiológicas Endósporos..... | 43 |
| Figura 13– Desempenho do tratamento preliminar de coagulação, floculação e decantação, para o parâmetro turbidez para o resíduo oriundo de Irati, nos três tempos de decantação (10, 20 e 30 minutos) e nas quatro dosagens de coagulante (0, 10, 20 e 30mg.L ⁻¹) | 46 |
| Fonte: A Autora, 2023. | 47 |
| Figura 14– Desempenho do tratamento da água de lavagem da Eta de Ponta Grossa por coagulação, floculação e decantação, na remoção de turbidez, em três tempos de decantação (10, 20 e 30 minutos) e nas quatro dosagens de coagulante PAC (0, 10, 20 e 30mg.L ⁻¹) | 48 |
| Figura 15- Gráfico referente aos resultados de pH utilizando coagulante recuperado do lodo de decantador com efluente de Irati e Ponta Grossa..... | 56 |
| Figura 16- Gráfico referente aos resultados de turbidez utilizando coagulante recuperado do lodo de decantador com efluente de Irati e Ponta Grossa. | 58 |
| Figura 17- Gráfico referente aos resultados de cor aparente do coagulante recuperado do lodo do decantador com efluente de Irati e Ponta Grossa..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 18- Gráfico referente aos resultados de pH do coagulante comercial PAC resíduos de Irati e Ponta Grossa..... | 64 |
| Figura 19- Gráfico referente aos resultados de turbidez do coagulante comercial PAC efluente de Irati e Ponta Grossa..... | 66 |
| Figura 20- Gráfico referente aos resultados de cor aparente do coagulante comercial PAC efluente de Irati e Ponta Grossa | 69 |
| Figura 21- Imagens demonstram alguns dos resultados obtidos quando aplicados coagulante recuperado, PAC e sem o uso do coagulante para os microrganismos. | 74 |
| Figura 22- Imagens demonstram alguns dos resultados obtidos quando aplicados coagulante recuperado, PAC e sem o uso do coagulante para EBA. | 75 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Análises físico-químicas e exames microbiológicos para a caracterização dos resíduos estudados. | 37 |
| Tabela 2 – Condições operacionais utilizadas para os ensaios preliminares de tratamento de água de lavagem de filtro em jar-test. | 40 |
| Tabela 3 - Caracterização da Água de lavagem de Ponta Grossa e Irati, média e desvio padrão..... | 44 |
| Tabela 4 – Média e desvio padrão dos ensaios preliminares de remoção de turbidez da água de lavagem de Irati. | 47 |
| Tabela 5 – Eficiências de remoção de turbidez no tratamento de água de lavagem de filtro da Eta de Irati nos diferentes tempos de sedimentação empregados. | 48 |
| Tabela 6 - Média e desvio padrão dos valores de turbidez remanescente nos ensaios com ALF de Ponta Grossa. | 50 |
| Tabela 7 – Eficiência decorridas do tempo de sedimentação referente a turbidez ao efluente de Ponta Grossa..... | 50 |
| Tabela 8- Caracterização do lodo de decantador de Irati e Ponta Grossa. | 51 |
| Tabela 9 - Caracterização do sobrenadante (coagulante recuperado) realizado com lodo de Irati com 2,5mL de ácido sulfúrico. | 52 |
| Tabela 10 - Caracterização do sobrenadante realizado com lodo de Ponta Grossa. | 53 |
| Tabela 11- Médias e desvio padrão do pH das amostras de ALF de Irati e Ponta Grossa nos ensaios utilizando coagulante recuperado de lodo de decantador, após os dois tempos de sedimentação estudados | 55 |
| Tabela 12 - Teste Tukey ($\alpha=0,05$) para a resposta pH do efluente da ETA Irati e Ponta Grossa, segundo fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação..... | 57 |
| Tabela 13- Médias e desvio padrão de turbidez das amostras de ALF de Irati e Ponta Grossa nos ensaios utilizando coagulante recuperado de lodo de decantador, após os dois tempos de sedimentação estudados | 58 |
| Tabela 14 - Teste Tukey ($\alpha=0,05$) para a resposta turbidez do efluente da Eta Irati e Ponta Grossa, segundo fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação..... | 59 |
| Tabela 15 – Eficiência decorridas do tempo de sedimentação referente a turbidez ao efluente de Irati e Ponta Grossa com coagulante recuperado..... | 59 |

| | |
|--|----|
| Tabela 16- Médias e desvio padrão de cor aparente das amostras de ALF de Irati e Ponta Grossa nos ensaios utilizando coagulante recuperado de lodo de decantador, após os dois tempos de sedimentação estudados..... | 61 |
| Tabela 17 -Teste Tukey (alpha=0,05) para a resposta cor aparente do efluente da Eta Irati e Ponta Grossa, segundo fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação. | 62 |
| Tabela 18 – Eficiência decorridas do tempo de sedimentação referente a cor aparente ao efluente de Irati e Ponta Grossa com coagulante recuperado..... | 62 |
| Tabela 19- referente aos resultados de pH do coagulante comercial PAC com resíduos de Irati e Ponta Grossa..... | 63 |
| Tabela 20 -Teste Tukey (alpha=0,05) para a resposta pH do efluente da Eta Irati e Ponta Grossa, segundo fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação..... | 64 |
| Tabela 21- Médias e desvio padrão de turbidez das amostras de ALF de Irati e Ponta Grossa nos ensaios utilizando coagulante comercial PAC, após os dois tempos de sedimentação estudados..... | 65 |
| Tabela 22 -Teste Tukey (alpha=0,05) para a resposta turbidez do efluente da ETA Irati e Ponta Grossa, segundo fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação..... | 67 |
| Tabela 23 – Eficiência decorridas do tempo de sedimentação referente a turbidez ao efluente de Irati e Ponta Grossa com PAC..... | 68 |
| Tabela 24 - Médias e desvio padrão de cor aparente das amostras de ALF de Irati e Ponta Grossa nos ensaios utilizando coagulante comercial PAC, após os dois tempos de sedimentação estudados..... | 68 |
| Tabela 25 -Teste Tukey (alpha=0,05) para a resposta cor aparente do efluente da ETA Irati e Ponta Grossa, segundo fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação..... | 70 |
| Tabela 26 – Eficiência decorridas do tempo de sedimentação referente a cor aparente ao efluente de Irati e Ponta Grossa com PAC..... | 70 |
| Tabela 27 - Referente aos resultados de CT do coagulante comercial PAC efluente de Irati e Ponta Grossa | 72 |
| Tabela 28 - Referente aos resultados de E. Coli do coagulante comercial PAC efluente de Irati e Ponta Grossa..... | 72 |

| | |
|--|----|
| Tabela 29 - Referente aos resultados de EBA do coagulante comercial PAC efluente de Irati e Ponta Grossa..... | 73 |
| Tabela 30 - Referente aos resultados de CT do coagulante RECUPERADO efluente de Irati e Ponta Grossa..... | 73 |
| Tabela 31 - Referente aos resultados de E. Coli do coagulante RECUPERADO efluente de Irati e Ponta Grossa..... | 73 |
| Tabela 32 - Referente aos resultados de EBA do coagulante RECUPERADO efluente de Irati e Ponta Grossa..... | 73 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALF – Água de lavagem de filtro
APHA – American Public Health Association
CR – Coagulante recuperado
CT– Coliformes totais
DQO – Demanda química de oxigênio
ETA – Estação de tratamento de água
Mg/L – Miligrama litro
NBR – Norma Brasileira
N.M. – Não Medido
PAC – Cloreto de polialumínio
PG – Ponta Grossa
pH – Potencial hidrogemônico
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
RETA – Resíduos em estações de tratamento de água
RPM – Rotação por minuto
SD – Sólidos Sedimentáveis
SSF – Sólidos suspensos fixos
SST – Sólidos suspensos totais
SSV – Sólidos suspensos voláteis
ST – Sólidos totais
STF – Sólidos totais fixos
STV – Sólidos totais voláteis
UC – Unidade de cor – unidade de medida de cor
USEPA – United States Environmental Protection Agency
UT– unidade de turbidez – unidade de medida de turbidez

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 Introdução | 17 |
| 2. Objetivos | 19 |
| 2.1 Objetivo geral | 19 |
| 2.2 Objetivos específicos..... | 19 |
| 3 Referencial teórico..... | 20 |
| 3.1 Resíduos gerados nas estações de tratamento de água (Eta)..... | 20 |
| 3.1.1 Tratamento de água para abastecimento | 20 |
| 3.1.2 Coagulação | 21 |
| 3.1.3 Floculação e Decantação/Flotação | 21 |
| 3.1.4 Tipos de tratamento para resíduos gerados no decantador | 22 |
| 3.1.5 Aspectos Legais | 25 |
| 3.1.6 Características da água de lavagem de filtro | 26 |
| 3.1.6.1 A recirculação da água de lavagem | 27 |
| 3.2 Características do lodo de decantador | 28 |
| 3.2.1 Recuperação do lodo | 29 |
| 3.2.2 Recuperação por via ácida..... | 30 |
| 3.2.3 Recuperação por via alcalina | 30 |
| 3.3 Características do Cloreto de Polialumínio (PAC). | 30 |
| 4 Materiais e métodos | 32 |
| 4.1 Descrição simplificada do sistema de tratamento de água..... | 33 |
| 4.1.1 Descrição do sistema de tratamento de água em que as amostras foram coletas da cidade de Irati e Ponta Grossa, Paraná..... | 34 |
| 4.2 Metodologia aplicada para caracterização dos resíduos de ALF e Lodo | 36 |
| 4.2.1 Regeneração de coagulante | 38 |
| 4.2.2 Tratamento preliminar da água de lavagem de filtro utilizando o policloreto de alumínio (PAC). | 39 |
| 4.2.3 Análises físico-químicas e microbiológicas realizadas na água de lavagem de filtro..... | 41 |
| 4.3 Ensaio microbiológico | 41 |
| 4.3.1 Ensaio microbiológico Escherichia Coli e Coliformes Totais..... | 41 |

| | |
|--|----|
| 4.3.2 Ensaio microbiológico de Endósporos aeróbios | 42 |
| 4.4 Análises estatísticas | 43 |
| 5 Resultados e discussão..... | 44 |
| 5.2 Caracterização da água de lavagem de filtro das ETA de Irati e Ponta Grossa (PR)..... | 44 |
| 5.1 Ensaio preliminar de tratamento de água de lavagem por coagulação/floculação/decantação utilizando coagulante PAC..... | 46 |
| 5.2 Caracterização do lodo do decantador, para produção de coagulante recuperado..... | 51 |
| 5.4 Regeneração do lodo de decantador. | 52 |
| 5.5 Comparação entre o coagulante recuperado e o policloreto de alumínio (pac)... | 55 |
| 5.5 Ensaio Microbiológico de Escherichia coli, coliformes totais e esporos de bactérias aeróbias..... | 72 |
| 6 Conclusão | 76 |
| referências..... | 78 |

1 INTRODUÇÃO

As Estações de Tratamento de Água (ETA) do Brasil têm como sistema mais empregado o de ciclo completo ou convencional, o qual é composto basicamente pelos processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. Essa concepção de tratamento produz resíduos, dentre eles a água de lavagem de filtro e o lodo gerado nos decantadores. Esses resíduos são produzidos no tratamento e tem relação direta com a qualidade da água captada dos mananciais e o tipo de processo/operação empregado na ETA.

Durante o processo de filtração os filtros acumulam impurezas e no momento da limpeza é gerada a água de lavagem de filtro. Esse resíduo é frequentemente descartado nas galerias pluviais sendo direcionado aos córregos próximos das ETA, mas também podem ser recirculados para a entrada da estação, assim diminuindo a demanda de água bruta a ser coletada (Mangesh, Jibhakate, *et al*, 2017). A ausência de tratamento desse resíduo pode representar risco à saúde pública no que se refere a qualidade da água fornecida para a população, sobretudo quanto ao risco de recontaminação da água por protozoários que são usualmente resistentes à cloração na etapa de desinfecção. A água de lavagem de filtro apresenta teor significativo de partículas em suspensão, microrganismos e substâncias dissolvidas que podem comprometer a qualidade da água tratada.

A crescente demanda por água potável de qualidade e segura, a redução da produção de resíduos e o princípio da economia circular tem motivado a busca por soluções eficientes para o tratamento e reaproveitamento de água de lavagem de filtro em estações de tratamento de água (ETA).

Por sua vez, o lodo do decantador possui elevadas concentrações de metais e sólidos, o que dificulta seu descarte em solos e também possui grande quantidade de água em sua composição o que torna sua desidratação e transportes caros, visto que por conta do aumento da produção destes resíduos, as empresas que produzem água devem minimizar a produção dos mesmos (Keeley, Jarvis e Judd , 2014).

O lodo do decantador é passível de ser regenerado, e dessa forma, tornando novamente o coagulante disponível para ser utilizado. Segundo Keeley, Jarvis e Judd (2014), a recuperação de coagulante a partir do lodo “tem o potencial de reduzir os impactos ambientais do tratamento de água e satisfazer muitos dos princípios da química verde”.

A regeneração de coagulante de lodo desempenha papel crucial na sustentabilidade. O coagulante é utilizado para aglomerar partículas na água, facilitando sua remoção durante a etapa de floculação e sedimentação. No entanto, após o uso, o coagulante se torna parte do lodo. Portanto, é interessante recuperar o coagulante presente no lodo dos decantadores e utilizá-lo no tratamento de água de lavagem de filtro, sendo esse o escopo da presente pesquisa.

O presente trabalho tem como objetivo investigar a viabilidade do tratamento da água de lavagem de filtro por meio de sedimentação simples e assistida por um coagulante recuperado do lodo de decantador da própria ETA. A sedimentação é um processo amplamente utilizado para a remoção de partículas suspensas, aproveitando a ação da gravidade para separar as partículas sólidas da água. No entanto, a eficiência da sedimentação pode ser melhorada com a adição de coagulantes, que promovem a formação de flocos mais densos e facilitam a remoção dessas impurezas.

Neste estudo, foram realizados experimentos em escala laboratorial para avaliar a eficiência da sedimentação simples e da sedimentação assistida utilizando coagulante recuperado do lodo de decantador.

Espera-se que este trabalho contribua para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e economicamente viáveis para o tratamento da água de lavagem de filtro em Eta, utilizando recursos internos, como o coagulante recuperado do lodo de decantador. A implementação dessa concepção poderá resultar em uma redução significativa dos custos operacionais, na minimização da produção de lodo e no melhoramento da qualidade da água tratada, atendendo às exigências de órgãos reguladores e garantindo a preservação dos recursos hídricos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho consiste em aplicar o conceito de economia circular em Estações de Tratamento de Água visando a recuperação de coagulante de lodo de decantadores e uso do mesmo no tratamento da água de lavagem de filtro.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o lodo de decantadores e a água de lavagem dos filtros das Etas em estudo;
- Obter o coagulante regenerado a partir do lodo de decantador;
- Avaliar o desempenho da coagulação, floculação e sedimentação utilizando coagulante recuperado na remoção de turbidez e cor aparente presente na água de lavagem dos filtros;
- Comparar a eficiência da sedimentação na remoção de turbidez e cor aparente da água de lavagem dos filtros com e sem a adição de condicionantes químicos;
- Avaliar a eficiência de remoção de microrganismos como E. Coli, Coliformes Totais e Esporos de Bactérias Aeróbias na sedimentação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Resíduos gerados nas estações de tratamento de água (Eta)

A problemática com resíduos gerados em estações de tratamento de água (RETA) é mundial, e isto pode variar dependendo das condições climáticas da região onde está localizado o país e o tipo da Eta. Existe uma Portaria Federal nº12.305 sancionada em 2010 no Brasil que exige que os RETA antes de serem lançados direto ou indiretamente em cursos de água ou no solo passem por um tratamento, (DI BERNARDO, DANTAS VOLTAN, 2012).

No Brasil, existem cerca de 7.500 ETA em operação, sendo a maioria delas de ciclo completo, o que inclui nelas coagulação, floculação, decantação e filtração. Este sistema é amplamente conhecido e gera resíduos principalmente nos decantadores e filtros. A maioria das estações fazem o despejo de seus resíduos em corpos d'água, divergindo assim das leis vigentes ao meio ambiente e causando danos. Sendo assim, as empresas que fazem o descarte inadequado devem estar cientes dos males ambientais que podem causar (ACHON, et al. 2013).

O sistema de ciclo completo é o processo que mais gera resíduos, com o decantador e a água de lavagem. O lodo é definido como resíduos sólidos na NBR 10014 e sua destinação deve estar de acordo com a Lei 12.305/2010 e na Lei 9.433/1997 que diz:

Estão sujeitos a outorga pelo Poder Público os direitos dos seguintes usos de recursos hídricos, lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final (BRASIL, 1997).

3.1.1 Tratamento de água para abastecimento

Para o tratamento da água bruta para fins de consumo existem basicamente três fases nas quais processos e operações vão inserir a clarificação, filtração e desinfecção. Sendo que, na fase de clarificação estão enquadradas as etapas de coagulação, floculação e decantação/flotação, onde nesta etapa ocorre principalmente a remoção de sólidos suspensos e uma parcela de sólidos dissolvidos (LIBÂNIO, 2010).

Ainda de acordo com Libânio (2010), a próxima etapa de filtração é responsável por remover sólidos dissolvidos e microrganismos, dentre eles bactérias e cistos e

ocistos de protozoários, e na desinfecção ocorre a inativação dos microrganismos que ainda estão presentes na água, como bactérias e vírus.

3.1.2 Coagulação

De acordo com Libânio (2010, p.153):

Etimologicamente, oriundo de raiz latina, o verbo coagular significa converter em sólido e o termo 'coagulação' surgiu em 1844 derivado do francês *coagulation*. Este processo decorreu inicialmente da necessidade de melhorar o aspecto visual da água para consumo humano. Ainda que a comprovação da água como veículo de doenças remonte somente aos meados do século XIX, era intrínseca a relação entre a maior concentração de partículas e a perspectiva da presença de microrganismos patogênicos. Esta percepção advinha em tempos imemoriais da contínua e inadequada deposição das excretas no solo, posteriormente arrastados pelas chuvas. Desta forma, à elevação da turbidez associava-se a perspectiva de transmissão de doenças devido ao aporte de microrganismos aos corpos d'água.

A coagulação abrange essencialmente a desestabilização das partículas coloidais, pela adição de íons com carga contrária à das partículas. Na estação de tratamento de água este processo ocorre na mistura rápida do tratamento (DI BERNARDO, DI BERNARDO, CENTURIONE FILHO, 2002; LIBÂNIO, 2010).

3.1.3 Floculação e Decantação/Flotação

A floculação ocorre após a coagulação e é considerada uma operação unitária por envolver apenas fenômenos físicos de aglutinação das partículas. Nela ocorre a agitação lenta, que tem como objetivo ocasionar encontros entre as partículas menores, formando partículas maiores (DI BERNARDO, DI BERNARDO, CENTURIONE FILHO, 2002; LIBÂNIO, 2010).

Segundo Libânio (2010, p.257):

A decantação, junto com a flotação, consiste na operação unitária que via de regra traduz a eficiência das etapas que a precedeu, ou seja, a coagulação e floculação, e em alguns casos mesmo a pré-desinfecção quando se objetiva a remoção de ferro e manganês. Na decantação aos flocos formados anteriormente são fornecidas condições que os permitam depositar pela ação da gravidade. Ambas operações objetivam diminuir o afluxo de partículas às unidades filtrantes, consistindo na última etapa da clarificação dentro do

contexto de múltiplas barreiras no qual o tratamento de água se insere. Desta forma, a nomenclatura correta preconiza referir às partículas sedimentadas e ao efluente como água decantada.

3.1.4 Tipos de tratamento para resíduos gerados no decantador

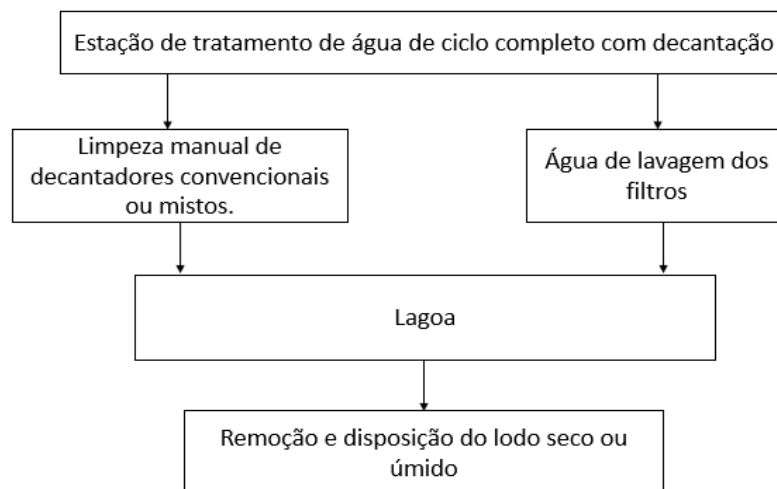
Na Eta de ciclo completo com limpeza manual do decantador a limpeza é realizada em um período de tempo de 15 dias a 3 meses, podendo ter alteração nas características do material pelo tempo de limpeza (DI BERNARDO, DANTAS, VOLTAN, 2012). A Figura 1, representa como é feita a limpeza dos decantadores pelo método manual nas estações de tratamento de água e a Figura 2, representa fluxograma do processo de concepção do tratamento dos resíduos das Etas.

Figura 1 – Limpeza dos decantadores de uma Eta



Fonte: Superintendência de água e esgoto, 2021.

Figura 2 – Fluxograma da concepção do tratamento dos resíduos das Eta.

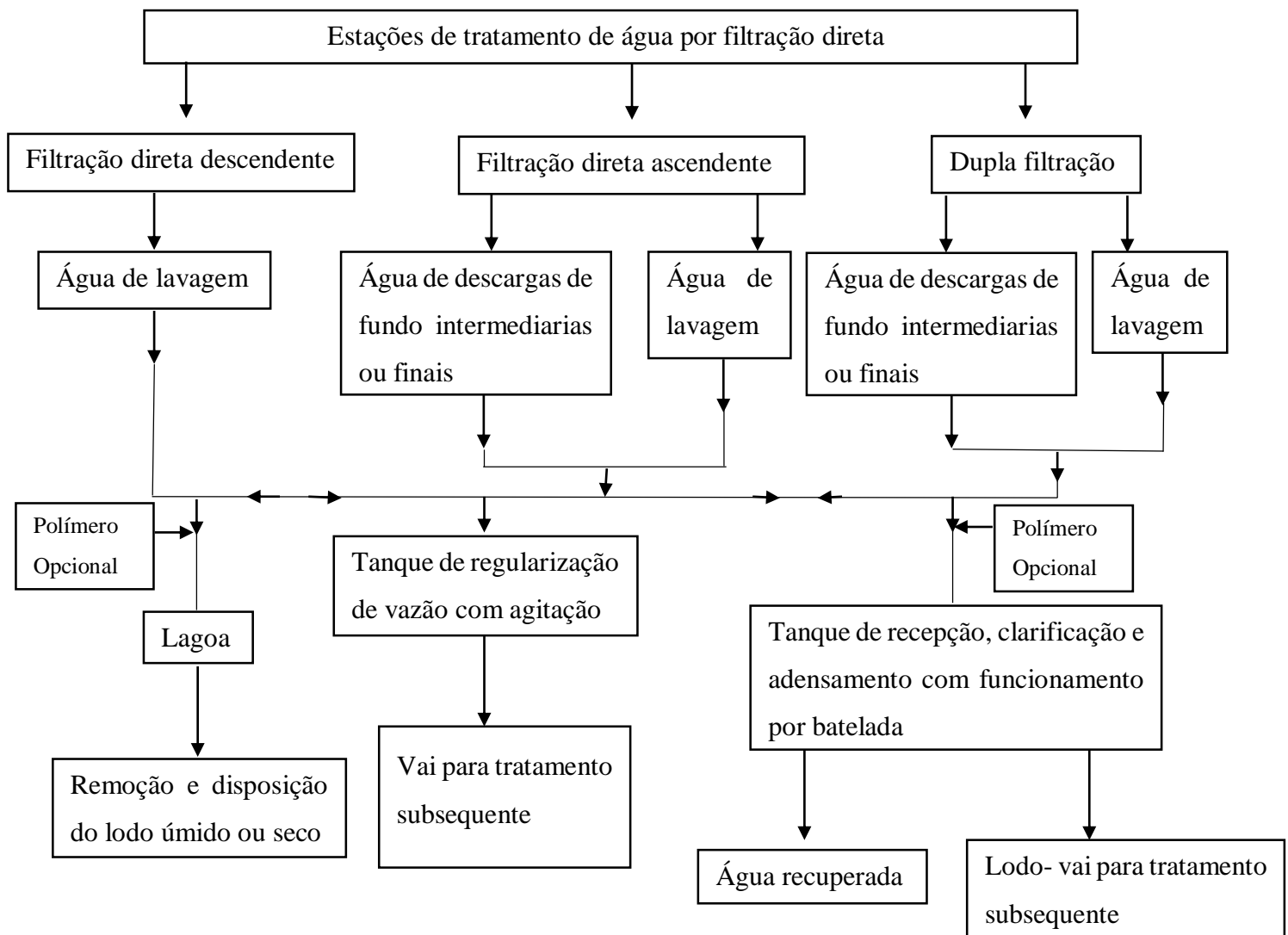


Fonte: Adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan, 2012.

No processo de produção de água existe a geração de resíduos devido a presença de impurezas na água e ainda aplicação de produtos químicos e essas impurezas têm diversas propriedades, que por sua vez são desconhecidas, dificultando seu tratamento (ACHON, BARROSO E CORDEIRO, 2013).

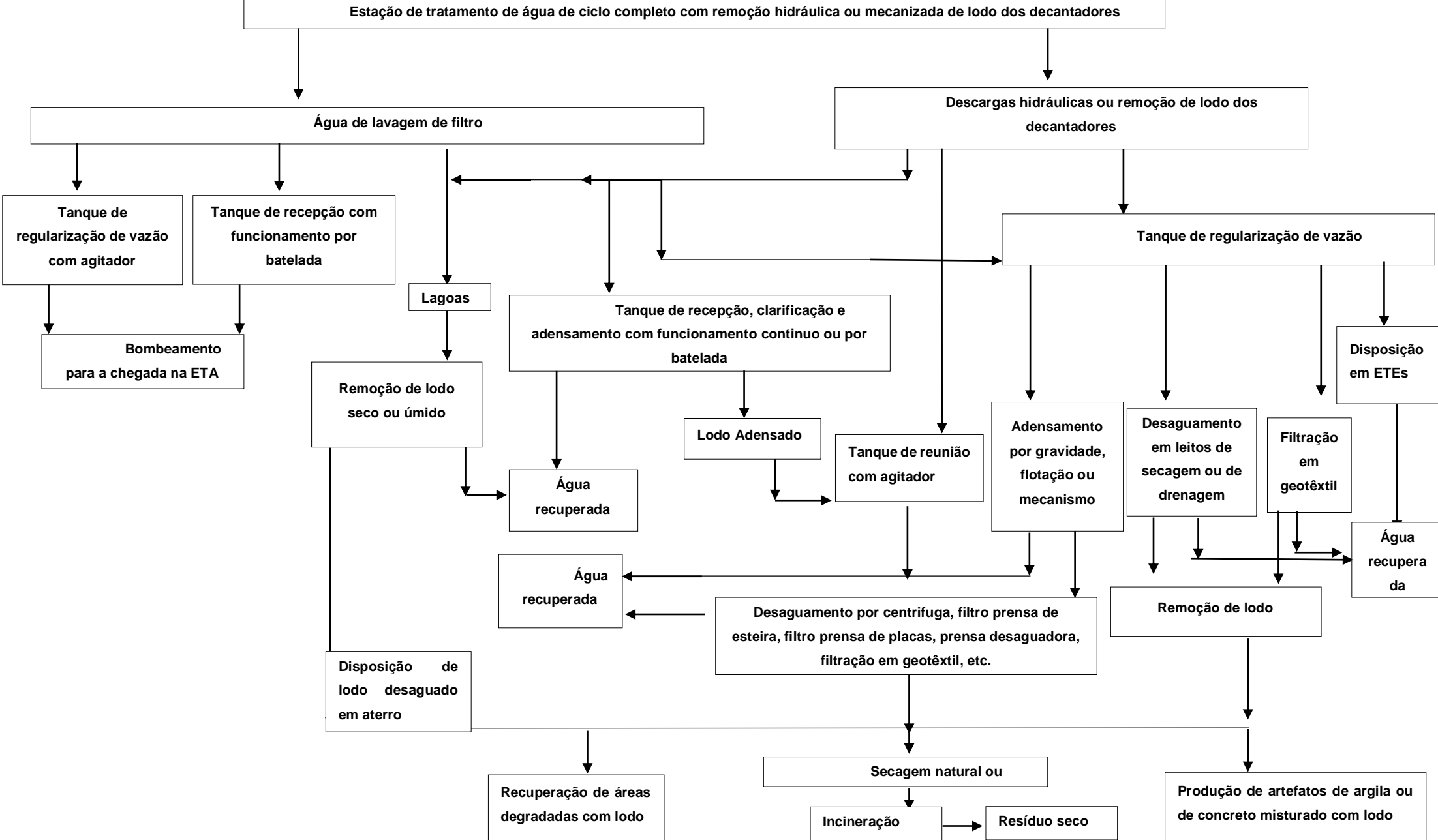
Além das Eta de ciclo completo e limpeza manual, existem as Etas de filtração direta e as ciclo completo com remoção hidráulica ou mecanizada de lodo dos decantadores. As Figuras 3 e 4 mostram fluxogramas que representam estas alternativas para tratamento.

Figura 3 – Fluxograma das alternativas para tratamento de resíduos de Etas de filtração direta.



Fonte: Adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan, 2012.

Figura 4– Alternativas de tratamentos de resíduos das Etas (Fonte: Adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan, 2012.)



A água proveniente de mananciais apresenta uma maior carga poluidora em relação às águas subterrâneas devido a sua exposição a diversos fatores ambientais. Nesse contexto, torna-se imprescindível o tratamento adequado para garantir a qualidade da água consumida. A água proveniente dos mananciais contém uma alta concentração de resíduos, tornando necessário o emprego de uma maior quantidade de substâncias químicas nas Estações de Tratamento de Água (Etas) para garantir que o tratamento esteja de acordo com as diretrizes estabelecidas na Portaria 888 de 4 de maio de 2021. As etapas que mais removem resíduos no tratamento de água é a coagulação e floculação, mas para isso é utilizado sulfato de alumínio e ou o policloreto de Alumínio, o PAC (SILVA, *et al*, 2012).

3.1.5 Aspectos Legais

De acordo com a ABNT NBR 10.004 de 2004, os resíduos gerados em estações de tratamento são considerados resíduos sólidos, visto que sua periculosidade é medida após a determinação de seus componentes. De acordo com a NBR mencionada anteriormente, a Lei Nº 12.305, sancionada em 2 de Agosto de 2010, estabelece distinções importantes entre resíduos sólidos e rejeitos, conforme o artigo 3º que define:

XV - Rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada; (BRASIL, 2010).

XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível; (BRASIL, 2010).

Conforme estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 de 2 a de agosto de 2010, ainda no art. 3º os resíduos são classificados como:

VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o

aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

E os rejeitos são classificados como:

VIII - disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) tem como objetivo a prevenção e a precaução, também relata a prioridade de gestão e gerenciamento, a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, tratamento dos resíduos e disposição final ambientalmente adequada. E por fim, de acordo com a CONAMA N° 430/2011 (BRASIL, 2011), que complementa a CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005), se comprovado poluição ou danos ao meio ambiente, o sujeito causador será punido conforme lei N° 9.605/1998, Lei de Crimes Ambientais, 1998.

3.1.6 Características da água de lavagem de filtro

No Brasil, a maioria das Eta utilizadas é a de ciclo completo, que por sua vez é um processo que gera resíduos e a sua forma de destinação é um tanto equivocada, pois na maioria dos casos ela é lançada diretamente nos corpos receptores sem tratamento, o que pode ocasionar problemas ambientais (BRAGA, et al, 2007).

Nas estações de tratamento de água existem algumas etapas que produzem resíduos e uma delas é a lavagem dos filtros, onde em alguns casos acaba sendo lançada no curso de água mais próximo. Os resíduos que são produzidos nas estações de tratamento de água devem ser tratados adequadamente, sendo analisados todos os produtos em sua composição, (DI BERNARDO, SCALIZE, 2000; DI BERNARDO, DI BERNARDO, CENTURIONE FILHO, 2002).

Segundo Di Bernardo, Di Bernardo, Centurione Filho (2002), nas Etas de ciclo completo uma das alternativas é coletar a água de lavagem de filtro, homogeneizar e

recircular para o início da Eta de forma correta. A lavagem dos filtros é realizada em intervalos de 12 a 48 horas.

Do volume que é tratado em uma Eta, em torno de 0,5 a 3% é destinado para a água de lavagem de filtro de acordo com Di Bernardo, Di Bernardo Dantas e Voltan, (2012). Já para Braga et al., 2007 a água de lavagem de filtro pode consumir um volume de 2 a 10% da água tratada em uma Eta.

Uma opção para a água de lavagem de filtro é a clarificação e recirculação para o início do processo de tratamento, de acordo com Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho, é devido à crescente escassez de mananciais.

De acordo com Guimarães (2005, p.17):

Para se evitar problemas dessa natureza, a água de lavagem, antes de ser recirculada, deve passar por um tanque de sedimentação, com ou sem adição de polímeros e de desinfetantes, garantido assim remoção de parte dos sólidos presentes na água.

Para tanto, os resíduos gerados no sistema de tratamento de água vêm se tornando uma preocupação mundial, pois, por mais que a maioria dos países desenvolvidos tenham um sistema adequado para tratá-los, ainda existe uma grande proporção de estações de tratamento de água que lançam seus resíduos em cursos d'água, principalmente em países em desenvolvimento (PROSAB, 2001).

3.1.6.1 A recirculação da água de lavagem

Com o crescimento da demanda populacional, indústrias e desenvolvimento tecnológico, o aumento do uso de água é cada vez maior e as poucas fontes de água doce do mundo já estão vulneráveis a poluição. Neste contexto uma opção mais sustentável seria a recirculação e reaproveitamento da água de lavagem de filtro (SILVA JUNIOR et al., 2014; MENEZES et al., 2005).

Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho, (2002, p.179), explicam que:

A clarificação da água de lavagem de filtro possibilita a recirculação do sobrenadante na câmara de chegada de água bruta da Eta, sendo imprescindível o monitoramento microbiológico do sobrenadante, pois este pode contribuir para o aumento significativo do número de microrganismos na água a ser tratada.

A recirculação é feita com a intenção de recuperar a água de lavagem, sendo dado um destino adequado para ela, onde as tecnologias para o tratamento se resumem em separar a fase líquida da sólida, tendo por consequência o aumento dos

sólidos na sedimentação e desidratação, tendo como reutilizar o sobrenadante e dar uma destinação correta para o material sedimentado (SCALIZE, 1997; OLINGER, 2002). Para cada tipo de água de lavagem de filtro deve ser feito um estudo, pois elas podem variar suas características.

A qualidade da água de lavagem de filtro está sujeita a múltiplos fatores que incluem o tipo de fonte hídrica utilizada na Estação de Tratamento de Água (Eta), seja proveniente de mananciais naturais ou represas artificiais, bem como as dosagens dos reagentes empregados e o sistema tecnológico adotado pela Eta (KOMOROWSKA-KAUFMAN, TOCZEK, 2022).

E de acordo com Komorowska-Kaufman, Toczek, (2022), a composição das águas residuais resultantes das operações de lavagem de filtro nas estações de tratamento de água de fontes superficiais está fortemente associada à qualidade da água bruta captada, a qual varia sazonalmente. Essas águas residuais da lavagem de filtro apresentam elevadas concentrações de partículas suspensas após a coagulação, além de compostos orgânicos e inorgânicos, microrganismos, protozoários e metais.

De acordo com Di Bernardo, (2002 p.180, apud FERREIRA FILHO 1997), existem algumas estações de tratamento de água do Brasil que realizam a recirculação de água de lavagem de filtro, entre elas a Guaraú e Alto da Boa Vista, ambas em São Paulo. Essas estações são responsáveis pelo abastecimento da maior parte da região metropolitana de SP, onde o reaproveitamento desta água reduz perdas e a redução do coagulante utilizado, pois as Etas são do tipo ciclo completo. Segundo USEPA (2002), nos Estados Unidos é feita a recirculação de água de lavagem de filtros.

3.2 Características do lodo de decantador

De acordo com, ACHON, BARROSO E CORDEIRO (2013, p.116)

Os principais resíduos gerados nas Etas, que possuem tecnologia de ciclo completo, são o lodo de decantadores e a água de lavagem de filtros (ALF). As principais perdas de água, neste tipo de sistema, ocorrem devido à necessidade de limpeza das unidades de tratamento para remoção de resíduos (lavagem de floculadores, decantadores e filtros) e vazamentos nas unidades e/ou tubulações.

A etapa de coagulação é responsável pela maior parte dos materiais residuais gerados durante o processo de tratamento de água. É importante ressaltar que tanto o tipo quanto a quantidade de coagulante utilizado têm um impacto significativo na quantidade de resíduo produzido. É fundamental considerar criteriosamente esses fatores para otimizar o processo de tratamento e reduzir o volume de resíduos resultante (MOHAMMED EVUTI, LAWAL, 2011).

Os subprodutos gerados nas Estações de Tratamento de Água (Eta) são comumente originados das atividades de lavagem dos filtros e das descargas do decantador, os quais contêm partículas presentes na água bruta e resíduos químicos provenientes dos processos de tratamento (BATISTA, MICHELAN, JESUS, NILIN, 2021).

Existem outras problemáticas com a disposição inadequada dos resíduos das Etas, estas estão associadas ao aspecto visual desagradável, o assoreamento, matérias orgânicas, metais e microrganismos no corpo receptor (DI BERNARDO, DI BERNARDO DANTAS, 2005).

Segundo Mohammed Evuti e Lawal (2011), a manipulação do lodo de tratamento de água deve estar em total conformidade com as regulamentações ambientais, especialmente neste período em que a prioridade é a tecnologia sustentável.

3.2.1 Recuperação do lodo

Segundo Guimarães (2005, p.25):

Hidróxidos metálicos são os principais constituintes de lodo de Etas, representando entre 50 e 75% dos sólidos presentes no resíduo. Os hidróxidos de alumínio e ferro têm boa solubilidade em meios ácidos e alcalinos, possibilitando, com o simples ajuste de pH a recuperação de coagulantes. O método permite uma drástica redução do volume e massa de lodo e possibilita a reutilização dos coagulantes recuperados. É importante lembrar que quanto maior o volume de coagulante recuperado menor é o volume de lodo residual.

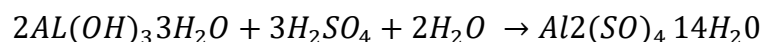
A regeneração do coagulante pode ser feita de duas maneiras, tanto por via ácida ou por básica. Na via ácida o ideal é que o pH da amostra fique entre 1 e 3, já

por via básica o pH deve ser elevado a valores entre 10 e 12. Nos produtos que são comercializados e utilizados nas ETAs os coagulantes geralmente apresentam valores de pH baixos, tendo presença praticamente de alumínio Al^{3+} ou $Al(H_2O)_6^{3+}$. Nas ETAs a coagulação quando feita com sal de alumínio tem resultados de pH entre 5,0 e 8,0 explica Di Bernardo, Dantas e Voltan, (2012). Portanto, a manutenção dos valores de pH controlados dentro dessa faixa é essencial para garantir que o processo de coagulação nas ETAs seja eficiente, permitindo a remoção eficaz de partículas suspensas e a liberação de água tratada de qualidade.

3.2.2 Recuperação por via ácida

A regeneração do coagulante acontece quando é adicionado ácido sulfúrico ou ácido clorídrico em lodos que podem conter alumínio ou ferro em sua composição. A prática da reciclagem pode minimizar custos e problemas que estão relacionados à disposição final dos lodos de ETA (DANDOLINI 2014).

Segundo Mohammed Evuti e Lawal (2011), “O conceito básico de recuperação de coagulante é o processo de digestão ácida onde o ácido sulfúrico reage com hidróxido de alumínio insolúvel para formar alúmen líquido diluído”.



3.2.3 Recuperação por via alcalina

Como alternativa à acidificação, a natureza anfotérica do óxido de alumínio também permite a recuperação do lodo de água em condições alcalinas (MOHAMMED EVUTI, LAWAL 2011). Porém, segundo Guimarães (2005), “com o processo de recuperação por via ácida, a regeneração por via alcalina não é um processo seletivo, solubilizando outros compostos presentes no lodo”.

3.3 Características do Cloreto de Polialumínio (PAC).

Segundo Purewater:

O Policloreto de Alumínio PAC, é um coagulante inorgânico e catiônico pré-polimerizado de baixo peso molecular a base de policloreto de alumínio. Esse coagulante possui cadeias de polímeros pré-formadas, exibindo uma alta

concentração de carga catiônica na unidade polimérica. Apresenta fórmula $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$, sendo utilizado em processos de tratamento de águas, tratamento de efluentes industriais, tratamento de esgoto.

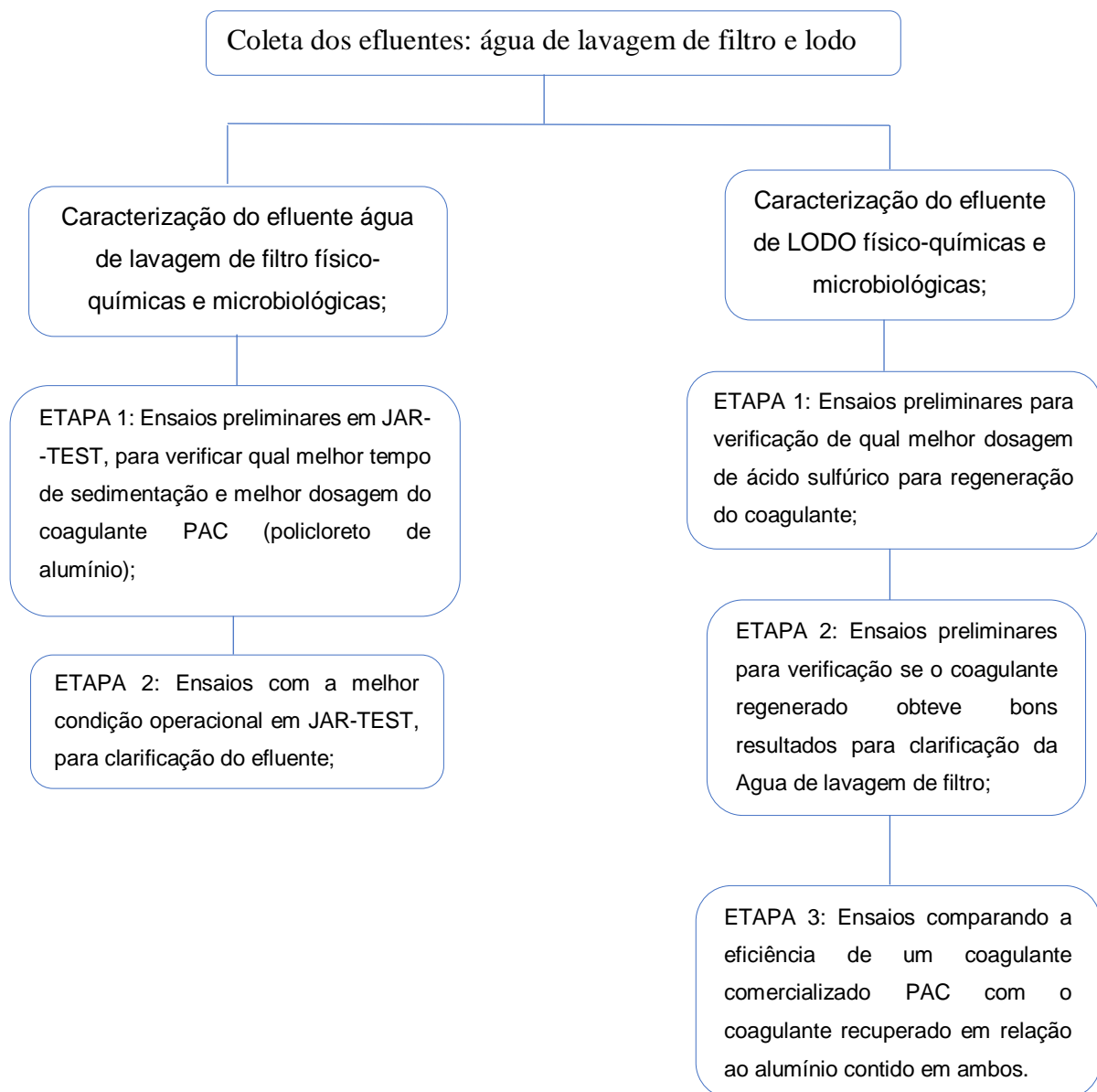
E ainda de acordo com Purewater:

O Policloreto de Alumínio tem como característica química agregar em sua molécula original cadeias poliméricas hidroxiladas, fundamentais nos processos de coagulação e floculação em tratamento de água. A posterior hidrólise irá proporcionar novas espécies insolúveis, que possibilitarão o processo de neutralização elétrica, que neste caso serão menos sensíveis que as espécies originárias a partir da hidrólise dos sais monoméricos. O policloreto de alumínio também conhecido como: PAC ou cloreto de poli alumínio proporciona ao entrar em contato com o líquido, núcleos de geração de incremento de floculação e sua hidrólise se desenvolve muito mais lentamente, facilitando assim o processo de neutralização das cargas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo reúne informações referentes aos ensaios realizados em laboratório para caracterização e tratamento da água de lavagem de filtro utilizando o coagulante PAC (policloreto de alumínio) e o coagulante recuperado do lodo do decantador da Eta. O procedimento de produção do coagulante recuperado também foi descrito. Os ensaios foram realizados na UNICENTRO, no Laboratório de Saneamento e Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Ambiental. Na Figura 5, está o cronograma do procedimento experimental desenvolvido.

Figura 5- Fluxograma do procedimento experimental



4.1 Descrição simplificada do sistema de tratamento de água

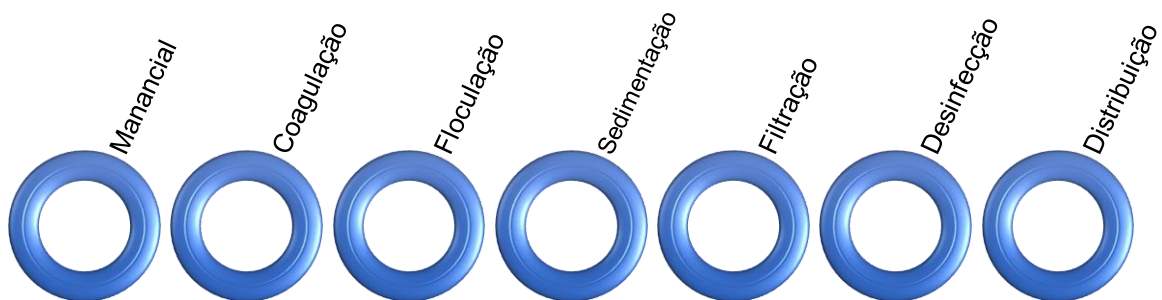
O primeiro passo é a captação da água, pois a água utilizada vem de mananciais, rios, lagos, fontes subterrâneas de água doce. Após este processo ela é direcionada para o tratamento, começando com a coagulação onde ocorre uma mistura rápida onde são adicionados produtos químicos que ajudam na aglomeração de impurezas.

A floculação é a continuação do processo de tratamento, onde a agitação fica lenta para assim ter um aumento do diâmetro dos flocos e após o tempo de agitação a água floculada deixa de ser agitada, ocorrendo a decantação por gravidade e assim os flocos e as sujeiras decantam no fundo do recipiente.

Na etapa de filtração a água decantada chega aos filtros, que também atuam por gravidade e ocorre a remoção dos flocos menores e microrganismos, isto acontece por meio da passagem por camadas filtrantes, dentre elas a areia é um exemplo.

E por fim, ocorre a desinfecção, fase do tratamento a qual é adicionado cloro, que é o mais utilizado, flúor e cal hidratada e após isso a água é encaminhada a reservatórios para ser destinada a população. A figura 6 a seguir mostra como é a sequência do sistema da estação.

Figura 6– Esquema do sistema de tratamento de água ETA.



Fonte: A Autora, 2023.

4.1.1 Descrição do sistema de tratamento de água em que as amostras foram coletadas da cidade de Irati e Ponta Grossa, Paraná.

Na estação de tratamento de Irati é implementado o sistema de tratamento de água denominado ciclo completo, amplamente utilizado no Brasil. Na Eta de Irati a captação é realizada no rio Imbituvão, a taxa de fluxo volumétrico alcança $35 L/s^{-1}$ e o coagulante policloreto de alumínio (PAC) é empregado para o tratamento da água bruta.

A coagulação hidráulica ocorre na adutora de água bruta, onde a vazão é dividida em dois conjuntos: Eta SERS e ETA Metálica. Após essa etapa, ocorrem as fases de floculação e decantação. A decantação é realizada nos flocodecantadores, resultando na formação de lodo, o qual é removido e direcionado para a rede pluvial.

Já o processo de filtração ocorre em 8 filtros circulares de fluxo ascendente, metade dos filtros operam com vazão nominal de $5 L/s^{-1}$, a outra parte opera com vazão de $7,5 L/s^{-1}$.

A fim de ajustar o pH, é realizada a adição de hidróxido de cálcio, seguida pela desinfecção com hipoclorito de sódio, cujo produto resultante é armazenado no centro de distribuição.

O procedimento de limpeza dos filtros é geralmente conduzido durante o período noturno, com lavagens ocorrendo a cada 48 horas ou sempre que a turbidez ultrapassar o limite de 0,5uT. A Figura 7 ilustra a sequência de eventos que ocorrem na estação de tratamento de água de Irati.

Figura 7- Diagrama de fluxo da Estação de Tratamento de Água de Irati, localizada no estado do Paraná.



Fonte: A Autora, 2023.

A estação de tratamento de água de Ponta Grossa, localizada no estado do Paraná, possui uma capacidade máxima de vazão de $350 L \cdot s^{-1}$ e emprega o sistema de tratamento da água bruta, conhecido como ciclo completo. Nessa estação, é comum utilizar o policloreto de alumínio (PAC) para o tratamento. Além disso, um aspecto distintivo é a adição de micro areias no início do processo de tratamento.

A captação da água bruta é realizada em dois pontos diferentes. Cerca de 40% da demanda é obtida a partir da represa alagados, enquanto os 60% restantes são captados do rio Pitangui.

Na etapa de mistura rápida o coagulante utilizado é o policloreto de alumínio (PAC), cuja dosagem é determinada por meio de estudos em laboratório. Em seguida, ocorrem as etapas de floculação e sedimentação. Para ajustar o pH, é adicionado ácido fluorsilícico (flúor) e, se necessário, pode ser feita a adição de hidróxido de cálcio

20%. Após esses processos, a água é direcionada aos reservatórios e encaminhada para a rede de distribuição.

A limpeza dos decantadores é realizada através das descargas, de acordo com um cronograma específico para cada decantador. Por outro lado, a limpeza dos filtros é realizada utilizando uma combinação de ar e água filtrada. A figura 8, mostra a sequência da Eta.

Figura 8-Diagrama de fluxo da Estação de Tratamento de Água de Ponta Grossa, localizada no estado do Paraná.



Fonte: A Autora, 2023.

4.2 Metodologia aplicada para caracterização dos resíduos de ALF e Lodo

Para o presente estudo foram realizadas coletas de amostras de duas estações de tratamento de água do Paraná, onde inicialmente foram realizadas análises para a caracterização da ALF e do lodo de decantador. Na Tabela 1 estão apresentadas as análises e métodos utilizados.

Tabela 1 – Análises físico-químicas e exames microbiológicos para a caracterização dos resíduos estudados.

| Análises de controle | Métodos utilizados | Número de referência do livro Standard Methods for The Examination of Water And Wastewater (2017). |
|--|--|---|
| Alcalinidade total (mg. L^{-1} $CaCO_3$) | Método titulométrico | 2320B |
| Dureza (mg. L^{-1} $CaCO_3$) | Método titulométrico | 2340C |
| Cor aparente (uC) | Espectrofotometria | 2120B |
| Cor verdadeira (uC) | Espectrofotometria | 2120B |
| Absorbância 254nm - ABS_{254} | Espectrofotometria | - |
| Condutividade elétrica ($\mu S. cm^{-1}$) | Potenciometria com eletrodo combinado | 2510B |
| Temperatura - T (oC) | Potenciometria com eletrodo combinado | 2550 |
| pH | Potenciometria com eletrodo combinado | 4500-H+B |
| Turbidez (uT) | Nefelometria | 2130 |
| Demanda química de oxigênio – DQO (mg. L^{-1}) | Espectrofotometria | 5220D |
| Sólidos totais - ST (mg. L^{-1}) | Gravimetria | 2440D |
| Sólidos totais voláteis – STV (mg. L^{-1}) | Gravimetria | 2440B |
| Sólidos totais fixos - STF (mg. L^{-1}) | Gravimetria | 2440B |
| Sólidos suspensos totais - SST (mg. L^{-1}) | Gravimetria | 2540C |
| Sólidos suspensos voláteis - SSV (mg. L^{-1}) | Gravimetria | 2540F |
| Sólidos suspensos fixos - SSF (mg. L^{-1}) | Gravimetria | 2540C |
| Sólidos sedimentáveis – SD (mL. L^{-1}) | Método do cone de Imhoff | 2540F |
| Coliformes totais-CT (UFC/100 mL) | Membrana filtrante | 9221B |
| Escherichia Coli (UFC/100 mL) | Membrana filtrante | 9222D |
| Endósporos (UFC/100 mL) | Membrana filtrante | 10061 |

Fonte: A Autora, 2023

4.2.1 Regeneração de coagulante

Os ensaios foram realizados em escala de bancada com a utilização de jar-test. Inicialmente foi realizada a limpeza dos jarros e logo em seguida foi inserido o lodo do decantador, sendo adicionado a esse ácido sulfúrico H_2SO_4 (concentrado) em diferentes volumes.

Para este estudo foi necessário variar o volume do ácido sulfúrico H_2SO_4 em diferentes volumes, volumes variados de 1 a 15 mL. Já adicionado os mesmos nos jarros, a mistura lenta para homogeneizar a amostra foi de 100 rpm por um tempo de 1 minuto e a agitação rápida para adicionar o H_2SO_4 , foi de 500 rpm por um tempo de agitação de 30 segundos, após isso ficou em agitação lenta por um tempo de 1 hora com a rotação de 140 rpm e um tempo de 1 hora de sedimentação.

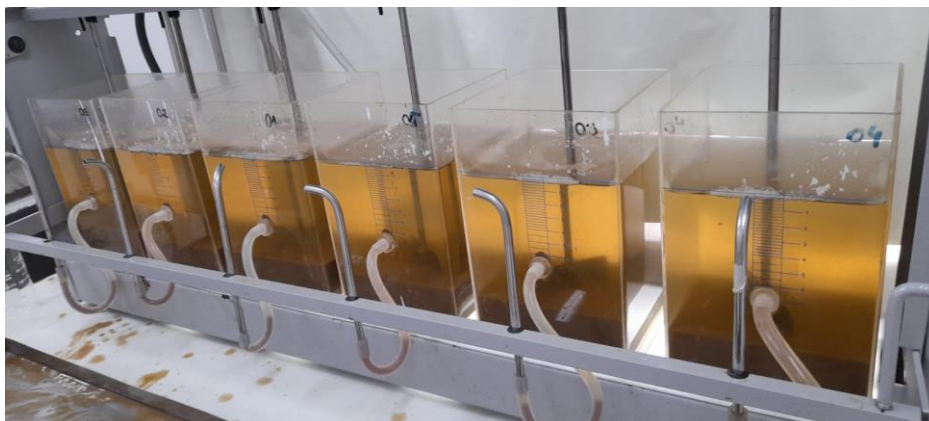
Após findar o tempo de sedimentação do lodo, foi coletado o sobrenadante para caracterização e as análises realizadas para o mesmo foram pH, turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO e alumínio de acordo com os procedimentos descritos na 21ª ed. do Standard Methods for The Examination of Water And Wastewater (2017). As figuras 9 e 10 demonstram o trabalho realizado em escala de bancada com o lodo.

Figura 9– Jar-test com o lodo para regeneração.



Fonte: A Autora, 2023.

Figura 10– Jar-test com o lodo recuperado.



Fonte: A Autora, 2023.

As figuras 9 e 10 são referentes a recuperação do coagulante, onde a figura 9 é o lodo adicionado ao tratamento ainda sem ter inserido o ácido sulfúrico para a sua recuperação e na figura 10 o lodo já passou pelo processo de recuperação, tendo o sobrenadante como coagulante regenerado.

Neste estudo, a escolha foi direcionada para investigar uma variante específica de ácido sulfúrico, com o propósito de analisar duas dosagens distintas e avaliar o comportamento resultante do lodo de decantador. Foram escolhidas as seguintes quantidades para análise: 2,5 mL usando o lodo de decantador de Irati e 3 mL com o lodo de decantador de Ponta Grossa. Foram determinados esses volumes devido ao fato de que o pH ficou próximo do referenciado por Di Bernardo *et al.* (2012), e para não ter aumento na coloração, pois quanto mais adição de ácido sulfúrico mais escuro ficava o sobrenadante.

4.2.2 Tratamento preliminar da água de lavagem de filtro utilizando o policloreto de alumínio (PAC).

Para iniciar foram realizados ensaios preliminares com a água de lavagem de filtro da cidade de Irati e Ponta Grossa, utilizando o equipamento Jar-test para os processos de coagulação, floculação e sedimentação. Nos ensaios em questão foi utilizado o coagulante comercial policloreto de alumínio (PAC).

Nesses ensaios preliminares foi preparado uma solução mãe de 23 g/L com o coagulante comercial e utilizados inicialmente um jarro sem coagulante, um com

10mg/L, 20mg/L e 30mg/L. Para realizar os cálculos foi utilizada a seguinte equação 1:

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (1)$$

Em que:

C_1 = Solução mãe de 23g/L;

V_1 = Volume utilizado da solução mãe para a dosagem necessária;

C_2 = Concentração desejada de coagulante em cada jarro do Jar-test;

V_2 = volume do jarro do jar-test.

Com as dosagens pré-estabelecidas foi realizado o ensaio, onde em cada jarro foi adicionado 2 litros da água de lavagem de filtro. Quando iniciado o equipamento a homogeneização inicial foi de 100 rpm no tempo de 1 minuto, após este tempo foi adicionado o coagulante em mistura rápida de 500 rpm por 30 segundos e tempo de mistura lenta de 20 minutos em 40 rpm. Na sequência foi coletado a cada 10 minutos uma amostra e realizados os parâmetros turbidez, cor aparente e pH. Na tabela 2 a seguir mostra as condições operacionais utilizadas para os ensaios.

Tabela 2 – Condições operacionais utilizadas para os ensaios preliminares de tratamento de água de lavagem de filtro em jar-test.

| Parâmetros | Condições operacionais adotadas |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Dosagem de coagulante (DC) | 0, 10, 20 e 30mg/L. |
| Gradiente de mistura rápida (Gmr) | 1000 s^{-1} |
| Tempo de mistura rápida (Tmr) | 30 s |
| Gradiente de mistura lenta (Gml) | 30 s^{-1} |
| Tempo de mistura lenta (Tml) | 20 m^{-1} |
| Tempo de sedimentação (Ts) | 10, 20 e 30 m^{-1} |

Fonte: A Autora, 2023.

O objetivo de ensaios preliminares é verificar as condições em que os parâmetros do material estudado se encontram para planejamento dos experimentos subsequentes.

4.2.3 Análises físico-químicas e microbiológicas realizadas na água de lavagem de filtro.

Realizadas as coletas, tanto a água de lavagem de filtro como a água pós tratamento foram caracterizadas como mostrado na tabela 1 e, conforme o item 4.1 os parâmetros realizados foram o de acordo com o 21° ed. do Standard Methods for The Examination of Water And Wastewater, (2017). Tendo como objetivo alcançar um resultado de turbidez abaixo de 10uT.

Já para a análise microbiológica o ideal é realizar a mesma no dia em que foi realizada a coleta e nunca exceder o prazo de 24 horas. Esses exames estão descritos no item 4.3.

4.3 ENSAIOS MICROBIOLOGICOS

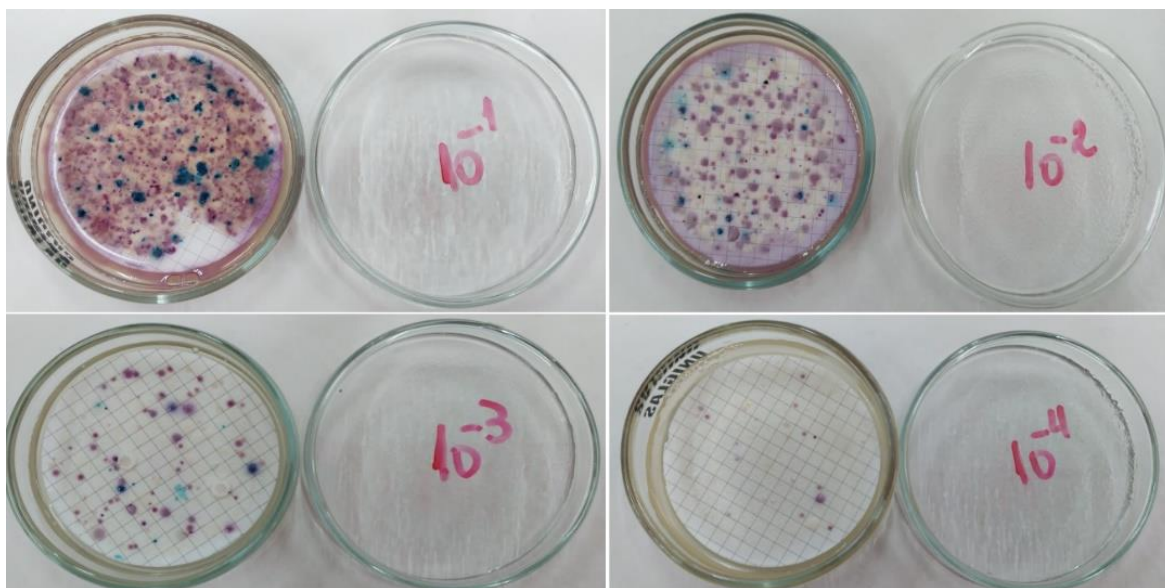
4.3.1 Ensaio microbiológico Escherichia Coli e Coliformes Totais

Para as análises microbiológicas inicialmente foi preparado e autoclavado todos os materiais para a realização do meio, desde a água destilada e os beckeres utilizados a $120^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e 103,3 kPa por 20 minutos.

O meio de cultura utilizado para as placas é o ágar Chromulcut[®], onde nas placas de petri eram colocados 10ml do meio, as membranas estéreis de nitrato de celulose quadriculadas com porosidade de 0,45 μm em sistema Manifold para filtração a vácuo com trapp de segurança e filtros autoclaváveis. Após filtradas foram incubadas por 24 ± 1 horas em uma estufa em temperatura de $36 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

A interpretação das placas se dá por meio de contagem das colônias, as colônias com coloração azul/ violeta são caracterizadas com Escherichia Coli e as colônias identificadas como salmão/vermelha são as Coliformes Totais a Figura 11 é um exemplo de como fica após feito todo o processo. Os resultados foram quantificados como Unidades Formadoras de Colônias (UFC), por 100ml.

Figura 11– Análises microbiológicas de E.coli e CT.



Fonte: A Autora, 2023.

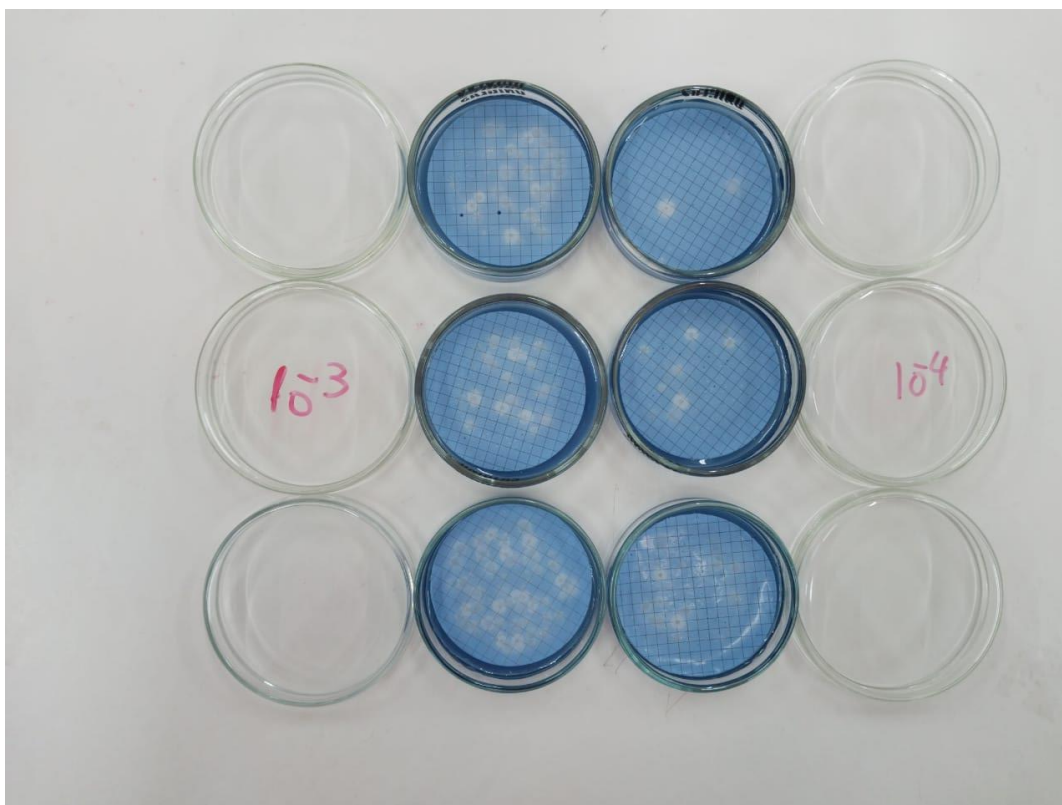
4.3.2 Ensaio microbiológico de Endósporos Aeróbios

As análises de endósporos foram realizadas da mesma forma em que são feitas a de E. Coli e CT, todavia as placas são feitas com ágar com azul de tripan e este meio de cultura deve ser autoclavado para posteriormente ser colocado nas placas de petri.

Antes do efluente ser filtrado ele é colocado em garrafas esterilizadas e é realizado banho-maria em uma temperatura de 80°C por 15 minutos. Após este tempo é retirado e feito banho de gelo deixando as amostras esfriarem a temperatura ambiente. Em seguida é realizada as filtragens e são incubadas por 24 ± 1 horas em uma estufa em temperatura de 36 ± 1°C.

Para a interpretação é realizado o procedimento de contagem conforme a E. coli e CT, o azul de tripan é adicionado para dar um fundo colorido à membrana e é considerado quaisquer colônias bacterianas crescendo na membrana como bactérias formadoras de esporos aeróbios, como exemplo a Figura 12.

Figura 12– Análises microbiológicas Endósporos.



Fonte: A Autora, 2023.

4.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para verificar qual foi o melhor tempo de sedimentação e a melhor dosagem de coagulante, foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado de dois fatores (tempo de decantação e dosagem de coagulante). Nesse caso foram realizados alguns testes para determinar a homogeneidade de variância. Em seguida foi realizado as premissas que são estabelecidas pelo teste ANOVA e por fim analisar a diferença estatística que foi efetuado pelo teste Tukey. O limite de significância utilizado foi de 5% ($\alpha = 0,05$).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No capítulo a seguir estão apresentados os resultados obtidos, iniciando-se com os ensaios preliminares com as águas de lavagem de filtro, ensaios preliminares com o lodo do decantador, caracterizações físico-químicas e ensaios finais nas condições otimizadas.

5.2 Caracterização da água de lavagem de filtro das ETA de Irati e Ponta Grossa (PR)

A Tabela 3 apresenta a caracterização físico-química das águas de lavagem de filtro dos municípios de Irati e Ponta Grossa no Paraná, na etapa de ensaios preliminares.

Tabela 3 - Caracterização da Água de lavagem de Ponta Grossa e Irati, média e desvio padrão.

| Parâmetros | Média ± desvio padrão Ponta Grossa | Média ± desvio padrão Irati |
|--------------------------------------|---|------------------------------------|
| Sólidos totais (mg/L) | 371,7±259,9 | 381±108,1 |
| Sólidos totais fixos (mg/L) | 127,7±39 | 203,3±146,8 |
| Sólidos totais voláteis (mg/L) | 244±292,7 | 177,7±43,6 |
| Sólidos em suspensão total (mg/L) | 101,3±45,5 | 188±98,2 |
| Sólidos em suspensão fixos (mg/L) | 60,3±24,9 | 96±12,2 |
| Sólidos em suspensão voláteis (mg/L) | 42±23,1 | 96±98,9 |
| Sólidos sedimentáveis (ml/L) | 13,3±9,5 | 110±40 |
| Cor aparente ALF (uC) | 326±111,7 | 1550±561,7 |
| Cor verdadeira (uC) | 7±2 | 6,7±2,5 |
| Turbidez (uT) | 33,7±7,1 | 200,3±66,3 |
| ABS 254 | 0,4±0,3 | 0,3±0,5 |
| Ph | 7,1±1,1 | 6,5±10,9 |
| Condutividade (µs/cm) | 97,3±10,5 | 79,3±1,2 |
| Temperatura (°C) | 23,2±3,9 | 23±2,1 |
| DQO (mg/L) | 47,5±82,3 | 64,6±68,8 |
| Alcalinidade (mg Caco3/L) | 26.800±11.092 | 53.667±7.638 |
| Dureza (mg Caco3/L) | 58.300±7.217 | 55.500±28.359 |

Fonte: A Autora, 2023.

Diante dos resultados apresentados na tabela 3, ocorreu uma variação nos parâmetros de cor aparente, pH e turbidez. Visto que na água de lavagem de Irati,

conforme os parâmetros também apresentados na Tabela 3, estão mais elevados do que o efluente de Ponta Grossa.

Verifica-se que na água de lavagem de Irati a turbidez do mesmo se encontra em próxima de 200uT, estando bem elevado, a cor aparente em 1550 uC e o pH ácido.

Para a água de lavagem do filtro de Ponta Grossa foi observado que a turbidez apresentava uma média de $33,7 \pm 7,1$ uT, indicando um valor moderado em vista que o objetivo do trabalho é chegar a um valor mais baixo que 10uT. Por outro lado, para a água de lavagem do filtro de Irati o parâmetro de turbidez apresentou uma média de $200,3 \pm 66,3$ uT, o que demonstra um valor consideravelmente maior em comparação com os resultados obtidos para a água de lavagem de Ponta Grossa.

De acordo com a resolução CONAMA 430 (2011), o descarte de efluentes deve estar em conformidade com as seguintes condições: o pH deve estar dentro da faixa de 5,0 a 9,0, a temperatura do efluente não deve exceder 40 °C.

Conforme estabelecido na resolução CONAMA 430 (2011), a concentração de material sedimentável no efluente a ser lançado em corpos de água não deve exceder 1 mL/L, sendo que, no caso analisado, ambos os efluentes excedem bastante esse limite. Portanto, como alternativa para cumprir a legislação e evitar impactos ambientais, a opção viável é submeter os efluentes a tratamento adequado para possibilitar sua recirculação, garantindo assim o reuso sustentável desses efluentes sem comprometer a conformidade com as normas ambientais.

Os resultados de Sólidos Suspensos Totais (SST) obtidos situaram-se na faixa de 100 a 200 mg/L, corroborando com valores mencionados por Di Bernardo e Dantas (2005).

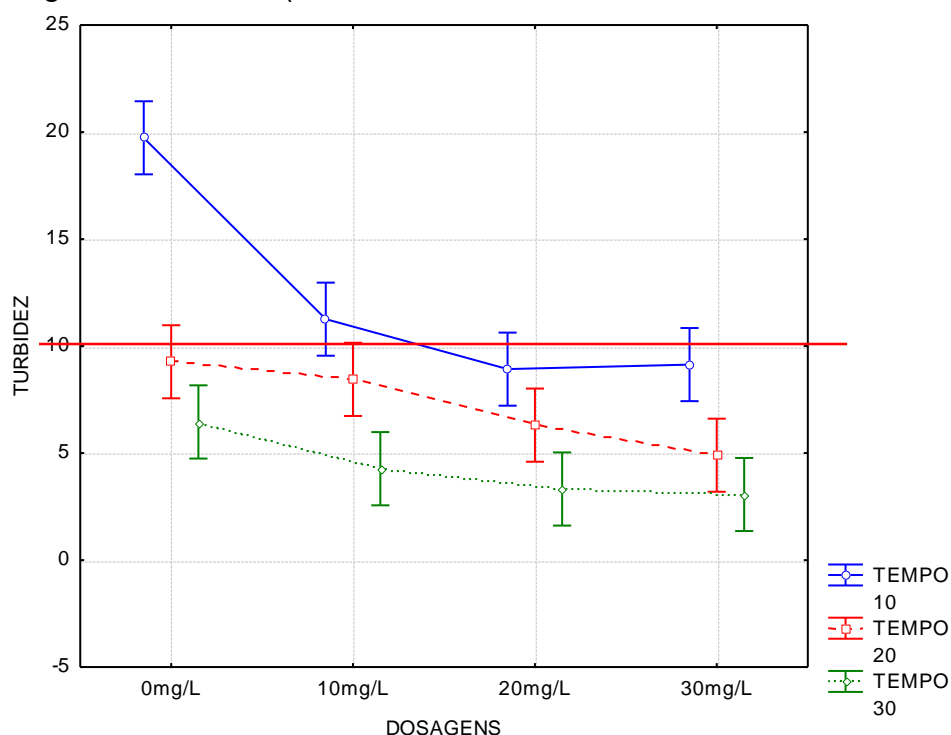
5.1 Ensaios preliminares de tratamento de água de lavagem por coagulação/floculação/decantação utilizando coagulante PAC.

Nesta primeira etapa do trabalho foram realizadas coletas de água de lavagem de filtro para realização de ensaios preliminares de coagulação/floculação/decantação em jar-test.

Na avaliação do tratamento da água de lavagem o parâmetro de controle foi a remoção da turbidez. A turbidez é resultado da presença de materiais suspensos coloidais, tais como argila, lodo e matérias orgânicas e inorgânicas (APHA et al., 2017). Esses componentes contribuem para a dispersão da luz na água, tornando-a turva e opaca.

Assim sendo, por meio da realização dos ensaios em jar-test, o objetivo é determinar a concentração ideal do coagulante a ser empregada para se obter a uma turbidez menor que 10uT remanescente no sobrenadante (tratado). Dessa forma, utilizando análises estatísticas, foram gerados os gráficos e tabelas com os dados obtidos no experimento. A Figura 13 ilustra graficamente o desempenho nesses ensaios.

Figura 13– Desempenho do tratamento preliminar de coagulação, floculação e decantação, para o parâmetro turbidez para o resíduo oriundo de Irati, nos três tempos de decantação (10, 20 e 30 minutos) e nas quatro dosagens de coagulante (0, 10, 20 e 30mg.L⁻¹)



Fonte: A Autora, 2023.

A meta estabelecida consistia em reduzir a turbidez da água de lavagem para valores inferiores a 10 uT (unidades de turbidez). Na Figura 13, observa-se que, com um tempo de sedimentação de apenas 10 minutos e doses de 20 mg/L e 30 mg/L do coagulante policloreto de alumínio (PAC) foram obtidos ótimos resultados, alcançando a meta de remoção de turbidez. Em tempos de sedimentação mais prolongados, em todas as dosagens de PAC atingiu-se a meta de remoção de turbidez.

A Tabela 4 demonstra que houve uma influência significativa da turbidez à medida que o tempo de sedimentação no jar-test era aumentado. Com teste realizado pela ANOVA mostra que ocorreu influência significativa tanto com o tempo quanto com a dosagens utilizadas, ($f_{tempo} = 95,17$ e $p < 0,01$; $f_{dosagem} = 33,78$ e $p < 0,01$) e entre os fatores também ocorreu interação ($f = 6,64$ e $p < 0,01$).

Tabela 4 – Média e desvio padrão dos ensaios preliminares de remoção de turbidez da água de lavagem de Irati.

| Dosagens(mg/L) | Tempo | Média ± desvio padrão |
|----------------|-------|-----------------------|
| 0 | 10 | 19,73±2,84 |
| 0 | 20 | 9,27±0,77 |
| 0 | 30 | 6,46±0,89 |
| 10 | 10 | 11,26±1,15 |
| 10 | 20 | 8,45±1,34 |
| 10 | 30 | 4,27±0,21 |
| 20 | 10 | 8,93±1,14 |
| 20 | 20 | 6,31±3,18 |
| 20 | 30 | 3,32±0,17 |
| 30 | 10 | 7,36±0,46 |
| 30 | 20 | 4,90±0,46 |
| 30 | 30 | 3,07±0,11 |

Fonte: A Autora, 2023.

A Tabela 5 contém as eficiências de remoção de turbidez para diferentes condições operacionais, obtidas por meio de ensaios em jar-test utilizando o policloreto de alumínio (PAC) como coagulante. É importante destacar que esses ensaios foram conduzidos utilizando amostras de água de lavagem do filtro proveniente da Estação de Tratamento de Água (Eta) de Irati.

Tabela 5 – Eficiências de remoção de turbidez no tratamento de água de lavagem de filtro da Eta de Irati nos diferentes tempos de sedimentação empregados.

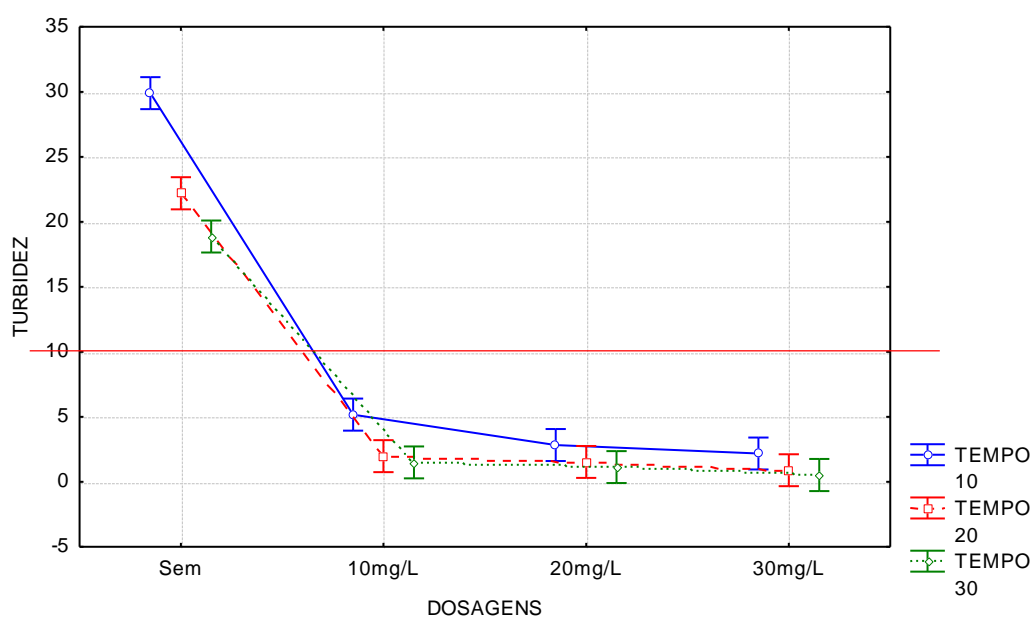
| TEMPO | 0mg/L | 10 mg/L | 20mg/L | 30mg/L |
|-------|--------|---------|--------|--------|
| 10 | 90,15% | 94,38% | 95,53% | 96,35% |
| 20 | 95,37% | 95,78% | 96,85% | 97,55% |
| 30 | 96,77% | 97,87% | 98,34% | 98,46% |

Fonte: A Autora, 2023.

Constata-se, por meio da Tabela 5, que a eficiência de remoção de turbidez foi consistentemente superior a 90%, resultando em desempenhos excelentes. Essa análise indica que a água de lavagem produzida na Estação de Tratamento de Água (Eta) de Irati, Paraná, possui uma boa capacidade de sedimentação, o que a torna facilmente tratável por uma sedimentação simples, ou seja, sem a necessidade do uso do coagulante. A instalação de um decantador na Eta permitiria a recirculação da água de lavagem de volta à entrada da Eta, com baixa concentração de sólidos, proporcionando um processo eficiente e seguro de tratamento.

A Figura 14 exibe os ensaios com a água de lavagem dos filtros provenientes da Estação de Tratamento de Água (Eta) de Ponta Grossa, Paraná.

Figura 14– Desempenho do tratamento da água de lavagem da Eta de Ponta Grossa por coagulação, floculação e decantação, na remoção de turbidez, em três tempos de decantação (10, 20 e 30 minutos) e nas quatro dosagens de coagulante PAC (0, 10, 20 e 30mg.L⁻¹)



Fonte: A Autora, 2023.

Como evidenciado na Figura 14, para o efluente de Ponta Grossa foram observadas diferenças estatísticas nos ensaios em jar-test nos quais nenhum coagulante foi adicionado. Nessas condições, não foi alcançada uma turbidez inferior a 10 uT em nenhum dos tempos avaliados, ressaltando assim, a necessidade da coagulação nesse processo. Isso mostra diferença marcante em relação a água de lavagem da Eta de Irati. Analisando a Tabela 3 presente no item 5.2, onde estão presentes as caracterizações da água de lavagem de Irati e Ponta Grossa nota-se que o valor dos sólidos sedimentáveis para ALF de Irati era bem superior da ALF de Ponta Grossa, e, portanto, mais partículas passíveis de sedimentação. Outro fator é a presença predominante de matéria orgânica, em termos proporcionais na ALF de Ponta Grossa, por exemplo a concentração de Sólidos Totais Voláteis (STV) eram maiores que os Sólidos Totais Fixos (STF), o inverso do que ocorreu para a ALF de Irati. Materiais orgânicos tem sedimentação mais lenta que materiais fixos (inertes), como a areia, por exemplo.

A Tabela 6 demonstra que houve uma influência significativa da turbidez à medida que o tempo de sedimentação no jar-test era aumentado. Com teste realizado pela ANOVA mostra que ocorreu influência significativa tanto com o tempo quanto com a dosagens utilizadas, ($f_{tempo} = 62,02$ e $p < 0,01$; $f_{dosagem} = 997,45$ e $p < 0,01$) e entre os fatores também ocorreu interação ($f = 14,57$ e $p < 0,01$).

Tabela 6 - Média e desvio padrão dos valores de turbidez remanescente nos ensaios com ALF de Ponta Grossa.

| Dosagens(mg/L) | Tempo | Média ± desvio padrão |
|----------------|-------|-----------------------|
| 0 | 10 | 29,90±1,05 |
| 0 | 20 | 22,20±1,71 |
| 0 | 30 | 18,87±0,64 |
| 10 | 10 | 5,17±0,98 |
| 10 | 20 | 1,97±0,22 |
| 10 | 30 | 1,50±0,75 |
| 20 | 10 | 2,83±1,46 |
| 20 | 20 | 1,53±0,54 |
| 20 | 30 | 1,14±1,53 |
| 30 | 10 | 2,18±1,38 |
| 30 | 20 | 0,89±0,24 |
| 30 | 30 | 0,53±0,26 |

Fonte: A Autora, 2023.

Para o resíduo ALF de Ponta Grossa, procedeu-se da mesma maneira que nos testes preliminares e nos cálculos de eficiência de remoção de turbidez para o efluente de Irati. Os resultados obtidos foram registrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Eficiência decorridas do tempo de sedimentação referente a turbidez ao efluente de Ponta Grossa.

| TEMPO | 0mg/L | 10 mg/L | 20mg/L | 30mg/L |
|-------|--------|---------|--------|--------|
| 10 | 11,27% | 84,66% | 91,60% | 93,53% |
| 20 | 34,12% | 94,15% | 95,46% | 97,36% |
| 30 | 44,00% | 95,55% | 96,62% | 98,43% |

Fonte: A Autora, 2023.

Constatou-se através da Tabela 7 que, nos ensaios com a água de lavagem de Ponta Grossa a etapa de coagulação foi fundamental para o tratamento desse efluente, revelando uma maior presença de sólidos com menor capacidade de sedimentação em comparação à água de lavagem da Eta de Irati. Essas discrepâncias estão associadas às características próprias dessa água e ao fluxograma de tratamento adotado na Eta.

Por exemplo, foi observada uma maior concentração de matéria orgânica na forma de sólidos totais voláteis em relação aos sólidos totais fixos na água de lavagem de Ponta Grossa, em comparação com a de Irati. Além disso, verificou-se uma elevada concentração de sólidos sedimentáveis na água de lavagem da Eta de Irati. Esses fatores podem explicar as diferenças na eficiência do tratamento e na necessidade de coagulação mais expressiva para a água de lavagem de Ponta Grossa.

5.2 Caracterização do lodo do decantador, para produção de coagulante recuperado

Para esta etapa de caracterização do lodo de decantador foram realizados alguns parâmetros para o lodo de decantador de Irati-PR e para o de Ponta Grossa-PR, conforme a Tabela 8.

Tabela 8- Caracterização do lodo de decantador de Irati e Ponta Grossa.

| Parâmetros | Resultados de Irati | Resultados de Ponta Grossa |
|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Sólidos totais (mg/L) | 8308 | 3956 |
| Sólidos totais fixos (mg/L) | 6444 | 2535 |
| Sólidos totais voláteis (mg/L) | 1864 | 1421 |
| pH | 5,94 | 6,00 |
| Temperatura (°C) | 15,9 | 24,5 |
| DQO (mg/L) | 266,79x10 ⁴ | 2.462,3 |

Fonte: A Autora, 2023.

De acordo com os parâmetros realizados o pH apresentou-se conforme relatado pelos autores Di Bernardo e Dantas (2005), com o valor situado na faixa de 5 a 8. O teor de alumínio revelou-se elevado devido à presença de elevada concentração de residuais do coagulante utilizado na Eta (PAC) que continha alumínio em sua composição.

Conforme relatado por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012), na maioria das Estações de Tratamento de Água (Etas) que empregam sal de alumínio no processo de coagulação, os valores de pH nos resíduos gerados pelas Etas situam-se entre 5,0 e 8,0. Verificou-se, por meio das análises realizadas neste estudo, que os resultados de pH se encontram dentro da faixa estimada pelos referidos autores.

Conforme mencionado por Gradin et al. (1993), apud Monteiro (2014), o lodo contém uma variedade de resíduos orgânicos e inorgânicos, incluindo bactérias, vírus, algas, coloides, sólidos, areia, silte, partículas orgânicas em suspensão, entre outros.

5.4 Regeneração do lodo de decantador.

Após a conclusão das análises físico-químicas das amostras, foram conduzidos experimentos com o intuito de determinar a dosagem ótima de ácido sulfúrico para produzir o coagulante recuperado. Conforme descrito por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012), é conhecido que o tratamento do lodo por meio de acidificação resulta em um pH ideal situado entre 1 e 3.

Após a realização dos experimentos e a seleção da dosagem adequada, foram conduzidas análises adicionais do sobrenadante produzido. A Tabela 9 a seguir apresenta os resultados da caracterização do sobrenadante (coagulante recuperado) realizados com o lodo de decantador de Irati, os quais foram obtidos por meio da avaliação dos seguintes parâmetros: turbidez, cor aparente, cor verdadeira, temperatura e pH. No processo de recuperação do coagulante foi empregada uma dosagem de 2,5 mL de ácido sulfúrico concentrado para o lodo de Irati, a qual foi a mais eficiente para o tratamento desse lodo, uma vez que resultou em uma redução significativa da turbidez e cor no sobrenadante.

Tabela 9 - Caracterização do sobrenadante (coagulante recuperado) realizado com lodo de Irati com 2,5mL de ácido sulfúrico.

| Parâmetros | Resultados obtidos |
|---------------------|--------------------|
| Turbidez (uT) | 24,1 |
| Cor aparente (uC) | 186 |
| Cor verdadeira (uC) | 179 |
| Temperatura (°C) | 18,4 |
| pH | 3,77 |
| Alumínio (mg/L) | 3.821 |

Fonte: A Autora, 2023.

Na condição apresentada na Tabela 9, referente ao lodo proveniente da cidade de Irati, constatou-se que o valor de pH obtido foi superior àquele mencionado na

literatura, em virtude de sua densidade elevada, o que impôs dificuldades até para realização de todos os parâmetros estabelecidos. Todavia, foi possível regenerar o alumínio produzindo assim, o coagulante recuperado mesmo com o pH de 3,77.

Na Tabela 10 são exibidos os resultados correspondentes ao lodo originário da ETA de Ponta Grossa, no qual foi empregada uma dosagem de 3,0 mL de ácido sulfúrico no processo de regeneração de coagulante.

Tabela 10 - Caracterização do sobrenadante realizado com lodo de Ponta Grossa.

| Parâmetros | Resultados obtidos |
|---------------------|--------------------|
| Turbidez (uT) | 202 |
| Cor aparente (uC) | 2.297 |
| Cor verdadeira (uC) | 877 |
| Temperatura (°C) | 24,5 |
| pH | 1,81 |
| Alumínio (mg/L) | 355,15 |

Fonte: A Autora, 2023.

Para o coagulante recuperado do lodo de decantador coletado em Ponta Grossa, o sobrenadante apresentou valores superiores de turbidez e cor em comparação a ALF de Irati. É importante destacar que tanto a turbidez quanto a cor aparente apresentaram valores maiores, o que sugere a ocorrência de alguma reação com o ácido sulfúrico utilizado no processo de recuperação. No entanto, vale ressaltar que as divergências nos volumes utilizados de ácido sulfúrico tanto no lodo de Irati quanto no de Ponta Grossa não demonstraram diferenças significativas nos resultados, uma vez que para realizar os ensaios os valores dos coagulantes foram baseados na mesma concentração de alumínio nos coagulantes, tanto no comercial quanto no recuperado.

O coagulante recuperado permite que os átomos de metais (Al ou Fe) estão disponíveis em solução e, portanto, reciclados e reutilizados. É para isto que é utilizado o ácido, para redissolver os metais dos coagulantes presentes no lodo. O coagulante recuperado tem um grande potencial de diminuir impactos que podem ser causados ao meio ambiente (KEELEY, JARVIS, JUDD, 2014).

O foco primordial desta pesquisa foi detecção do elemento químico Alumínio (Al) na amostra do sobrenadante, após a regeneração do lodo decantador, uma vez que sua presença é crucial para o processo de coagulação.

5.5 COMPARAÇÃO ENTRE O COAGULANTE RECUPERADO E O POLICLORETO DE ALUMINIO (PAC)

Nesta fase do estudo, foram conduzidos ensaios utilizando o equipamento Jar-test para avaliar o desempenho comparativo dos coagulantes no processo de tratamento. Abaixo estão as tabelas e gráficos que ilustram os resultados obtidos nos ensaios. A Tabela 11 apresenta a variação dos valores de pH em função das diferentes dosagens de coagulante recuperado adicionados aos jarros de teste.

Tabela 11- Médias e desvio padrão do pH das amostras de ALF de Irati e Ponta Grossa nos ensaios utilizando coagulante recuperado de lodo de decantador, após os dois tempos de sedimentação estudados

| Concentração de coagulante | Tempo de 15 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 30 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 15 minutos (IRATI) | Tempo de 30 minutos (IRATI) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0 mg/L | 7,447 ± 0.006 | 7,420 ± 0.026 | 7,13±0,010 | 7,223±0,006 |
| Com 10 mg/L | 4,143 ± 0,038 | 4,113 ± 0,012 | 6,993±0,06 | 7,210±0,044 |
| Com 30mg/L | 3,190 ± 0,050 | 3,153 ± 0,040 | 6,720±0,105 | 6,957±0,015 |

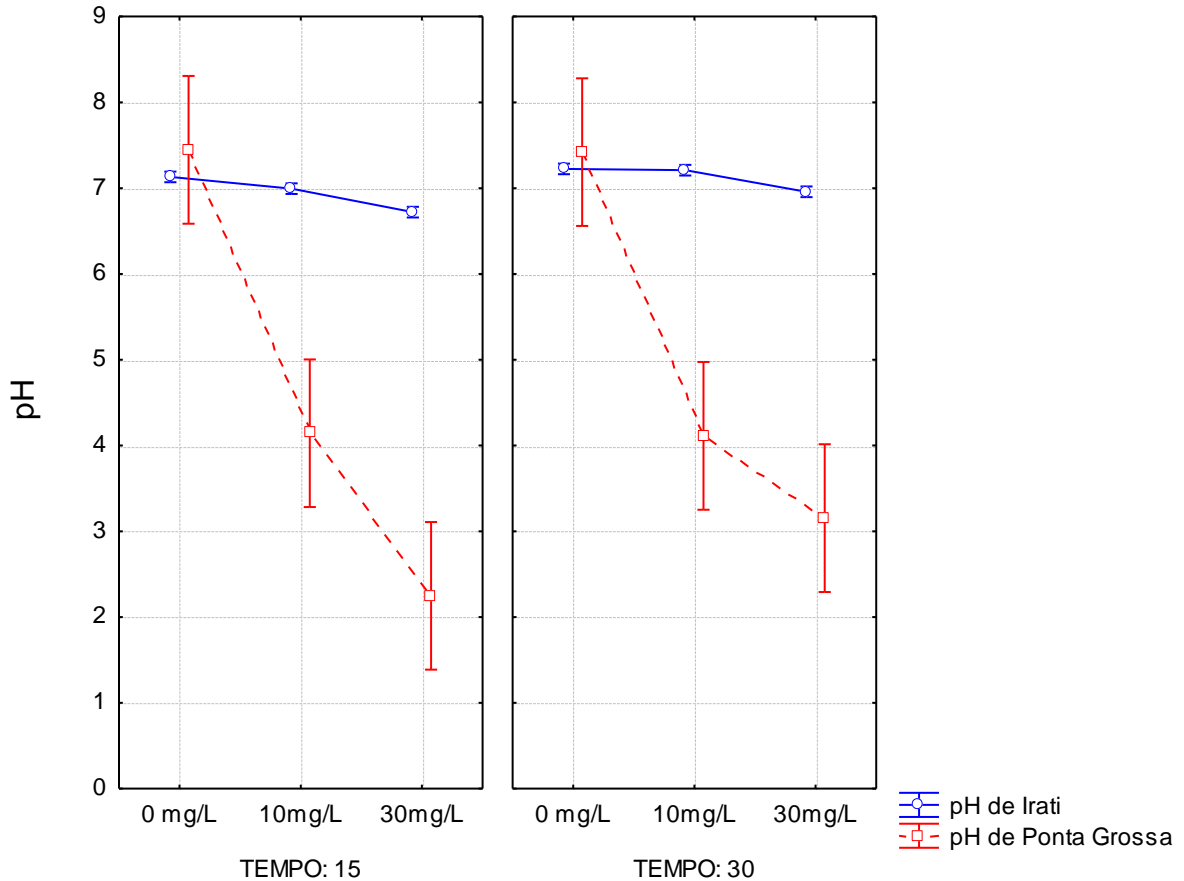
Fonte: A Autora, 2023.

De acordo com a tabela 11, a concentração sem o uso do coagulante dosagem 0, não ocorreu redução significativa do pH inicial, não demonstrando portanto alterações no pH inicial de 7,447, apresentando apenas um leve decaimento devido à sedimentação. Por outro lado, as demais dosagens resultaram em mudanças consideráveis no pH, devido ao processo de aplicação do coagulante, o que envolve a adição de ácido sulfúrico (H_2SO_4) para diminuir o pH. Quando adicionado ácido sulfúrico (H_2SO_4) a uma solução aquosa, o pH dessa solução geralmente diminui, tornando-se mais ácido. Isso ocorre porque o ácido sulfúrico é uma substância ácida forte que ioniza completamente em solução aquosa, liberando íons de hidrogênio (H^+) na solução.

Conforme o autor Bratby, (2016), a alteração do pH está relacionada à basicidade do coagulante, sendo que quanto maior a basicidade menor será a mudança no pH. Além disso, Rocha et al. (2019) também constataram em sua pesquisa que ocorreram variações no pH, chegando a diminuí-lo para valores abaixo de 3. A Figura 15 ilustra a resposta do parâmetro de pH em relação às diferentes

dosagens do coagulante recuperado, empregadas tanto no resíduo de ALF de Irati quanto na de Ponta Grossa.

Figura 15- Gráfico referente aos resultados de pH utilizando coagulante recuperado do lodo de decantador com efluente de Irati e Ponta Grossa.



Fonte: A Autora, 2023.

Conforme apresentado na Tabela 12, os valores referentes ao parâmetro de pH para o efluente de Irati não exigem diferença significativa, possivelmente devido a algum fator, como a alcalinidade. No entanto, no caso do efluente de Ponta Grossa, esse mesmo processo não ocorreu. Na seção 5.2 do estudo, os resultados de alcalinidade foram expressos, revelando uma discrepância entre os efluentes em questão.

Tabela 12 - Teste Tukey ($\alpha=0,05$) para a resposta pH do efluente da ETA Irati e Ponta Grossa, segundo fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação.

| TESTE TUKEY PH Ponta Grossa e IRATI | | | | | |
|-------------------------------------|---------|--------------------|---|-------------|---|
| TEMPO | DOSAGEM | MÉDIA Ponta Grossa | | MÉDIA IRATI | |
| 30 | Sem | 7,4200 | a | 7,2233 | a |
| 15 | Sem | 7,4467 | a | 7,1300 | a |
| 30 | 10mg/L | 4,1133 | b | 7,2100 | a |
| 15 | 10mg/L | 4,1433 | b | 6,9933 | b |
| 30 | 30mg/L | 3,1533 | c | 6,9566 | b |
| 15 | 30mg/L | 3,1900 | c | 6,7200 | c |

Fonte: A Autora, 2023.

*Médias seguidas com letras diferentes se diferem, conforme teste de Tukey, com 5% de significância.

Para a Eta de Irati observou –se que tanto tempo como dosagem influenciaram significativamente no pH da amostra ($f_{tempo} = 61,4$ e $p < 0,01$; $f_{dosagem} = 77,9$ e $p < 0,01$) não ocorrendo interação significativa entre os fatores supracitados. Já ETA de Ponta Grossa, o tempo não influenciou ($f_{tempo} = 0,73$ e $p = 0,40$) porém as diferentes dosagem interferiram significativamente ($f_{dosagem} = 75,50$ e $p < 0,01$) também não ocorrendo interação entre os fatores ($f = 0,93$ e $p = 0,42$).

Para a variável de turbidez, o uso do coagulante recuperado obteve bons resultados, conforme indicado na Tabela 13. É notável a eficácia alcançada pelo coagulante recuperado. Mesmo sem adição de coagulante, houve uma melhora significativa na turbidez, sendo importante ressaltar que nessa dosagem específica, nenhum coagulante foi adicionado.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 13, a concentração que demonstrou melhor desempenho do coagulante recuperado para o resíduo de Irati na dosagem de 30mg/L. Essa dosagem alcançou uma eficiência superior a 80% na remoção de turbidez.

No caso do resíduo de Ponta Grossa, os melhores resultados foram obtidos na concentração de 0mg/L, indicando que não é necessário adicionar coagulante para obter um bom desempenho na remoção de turbidez. Entretanto, mesmo na concentração de 30mg/L, onde não foi alcançado um valor menor que 10uT de turbidez, foi observada uma significativa remoção de turbidez, conforme evidenciado na Tabela 13.

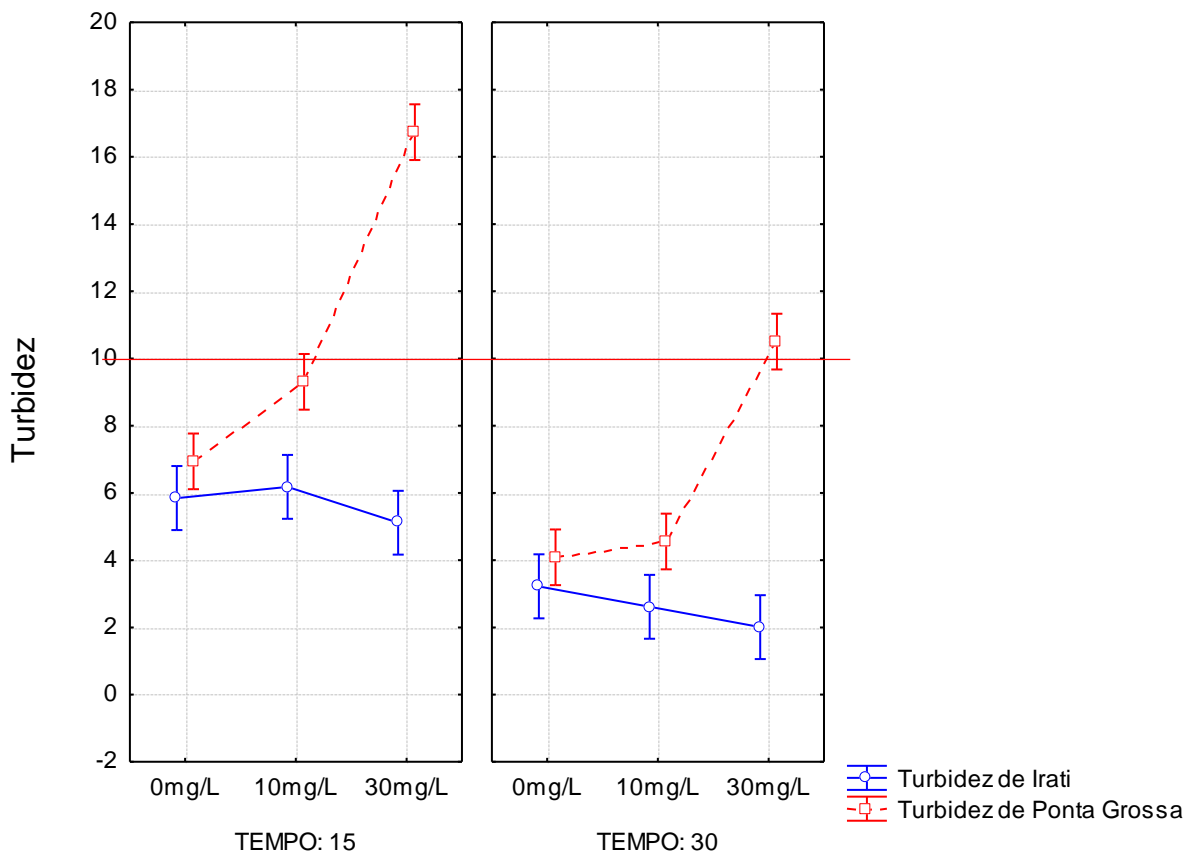
Tabela 13- Médias e desvio padrão de turbidez das amostras de ALF de Irati e Ponta Grossa nos ensaios utilizando coagulante recuperado de lodo de decantador, após os dois tempos de sedimentação estudados

| Concentração de coagulante | Tempo de 15 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 30 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 15 minutos (IRATI) | Tempo de 30 minutos (IRATI) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0 mg/L | 6,940 ±1,266 | 4,087±0,194 | 5,847±0,311 | 3,220±0,069 |
| Com 10 mg/L | 9,303±0,570 | 4,557 ±0,328 | 6,180±0,753 | 2,613±0,459 |
| Com 30mg/L | 16,733 ±0,404 | 10,500±0,040 | 5,113±1,594 | 2,007±0,100 |

Fonte: A Autora, 2023.

A Figura 16 apresenta a análise do comportamento dos efluentes na presença do coagulante recuperado. Nesta representação, são observadas as respostas e tendências gráficas dos efluentes quando expostos ao coagulante recuperado.

Figura 16- Gráfico referente aos resultados de turbidez utilizando coagulante recuperado do lodo de decantador com efluente de Irati e Ponta Grossa.



Fonte: A Autora, 2023

De acordo com essa Figura 16, o coagulante recuperado teve efeito positivo no tratamento. Já para Eta de Ponta Grossa produziu flocos de baixa sedimentabilidade

e, portanto, chegou a piorar a qualidade da água de lavagem, sobretudo na maior dosagem.

Tabela 14 - Teste Tukey ($\alpha=0,05$) para a resposta turbidez do efluente da Eta Irati e Ponta Grossa, segundo fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação.

| TESTE TUKEY TURBIDEZ Ponta Grossa e IRATI | | | | | |
|---|---------|--------------------|---|-------------|----|
| TEMPO | DOSAGEM | MÉDIA Ponta Grossa | | MÉDIA IRATI | |
| 30 | Sem | 4,08667 | d | 3,22000 | ac |
| 15 | Sem | 6,94000 | b | 5,84667 | b |
| 30 | 10mg/L | 4,55667 | d | 2,61333 | c |
| 15 | 10mg/L | 9,30333 | c | 6,18000 | b |
| 30 | 30mg/L | 10,50000 | c | 5,11333 | ab |
| 15 | 30mg/L | 16,73333 | a | 2,00667 | c |

Fonte: A Autora, 2023.

*Médias seguidas com letras diferentes se diferem, conforme teste de Tukey, com 5% de significância.

Ao conduzir análises de variância (ANOVA), observou-se que o tempo influenciou significativamente para a amostra de turbidez ($f_{tempo} = 75,63$ e $p < 0,01$) já a dosagem não demonstrou influencia ($f_{dosagem} = 2,91$ e $p < 0,09$), e também não ocorreu interação significativa entre os fatores ($f = 0,58$ e $p = 0,57$).

No entanto para Ponta Grossa ocorreu influência significativa tanto para tempo quanto para dosagem ($f_{tempo} = 220,29$ e $p < 0,01$; $f_{dosagem} = 258,75$ e $p < 0,01$) ocorrendo interação entre os fatores supracitados.

Tabela 15 – Eficiência decorridas do tempo de sedimentação referente a turbidez ao efluente de Irati e Ponta Grossa com coagulante recuperado.

| Dosagem | TEMPO | | | |
|---------|-----------------|-----------------|----------|----------|
| | 15 Ponta Grossa | 30 Ponta Grossa | 15 IRATI | 30 IRATI |
| 0mg/L | 79,41% | 87,87% | 97,08% | 98,39% |
| 10 mg/L | 72,40% | 86,48% | 96,91% | 98,70% |
| 30 mg/L | 50,35% | 68,84% | 97,45% | 98,99% |

Fonte: A Autora, 2023.

No contexto da avaliação da eficácia do processo de sedimentação conforme a tabela 15, durante um período temporal de 15 minutos de processo de

sedimentação, pode-se constatar que para a concentração de 0 mg/L, os resultados alcançados revelaram uma eficiência de 79,41% para a localidade de Ponta Grossa, enquanto para a região de Irati, esse índice foi ampliado para 97,08%. Notavelmente, evidenciou-se que o desempenho do tratamento empregado sobre o efluente de Ponta Grossa apresentou-se comparativamente inferior ao observado para o efluente proveniente de Irati. Tal disparidade pode ser atribuída à presença mais acentuada de partícula sólida no efluente de Ponta Grossa em relação ao Irati.

Entretanto, cabe ressaltar que, quando empregado 10 mg/L de coagulante recuperado, os resultados obtidos adquiriram caráter positivo para ambas as localidades de estudo, ou seja, tanto para o efluente proveniente de Ponta Grossa quanto para o de Irati, obtendo resultados de turbidez abaixo de 10uT.

No contexto da avaliação do efluente proveniente da região de Irati, quando submetido a uma dosagem específica do coagulante em uma concentração de 10mg/L, os resultados decorrentes do período de sedimentação de 15 minutos se revelaram altamente satisfatórios. Além disso, ao estender a duração da sedimentação para um intervalo de 30 minutos, constatou-se uma ausência de variação notável nos resultados, o que conduziu a uma manutenção consistente da eficiência no processo de remoção de turbidez, a qual permaneceu acima de 90%.

De acordo com um estudo conduzido por Keeley *et al.* (2014), os coagulantes utilizados demonstraram eficiência na faixa de 60% a 70% na remoção de turbidez das águas tratadas, incluindo o alúmen recuperado purificado, o coagulante fresco e o coagulante não filtrado. Portanto, os resultados obtidos no presente estudo são consistentes com a eficiência percentual mencionada anteriormente. Para o estudo do mesmo foi utilizado o equipamento de Jar-test com água bruta.

De acordo com a pesquisa conduzida por Rocha *et al.* (2019), os experimentos de caráter controlado, nos quais o coagulante recuperado foi empregado como agente de tratamento, manifestaram uma eficácia que se situou em um patamar superior a 90% tanto no que se refere à redução da turbidez quanto à atenuação da intensidade da cor aparente. Os ensaios do autor citado foram realizados com água de alto teor de turbidez e os ensaios feitos no equipamento Jar-test.

Logo a seguir, encontra-se apresentado a Tabela 16, a qual contém os valores médios e desvio padrão correspondentes aos efluentes provenientes das localidades de Irati e Ponta Grossa, destinados à avaliação da remoção de cor aparente mediante a utilização do coagulante recuperado como agente de tratamento.

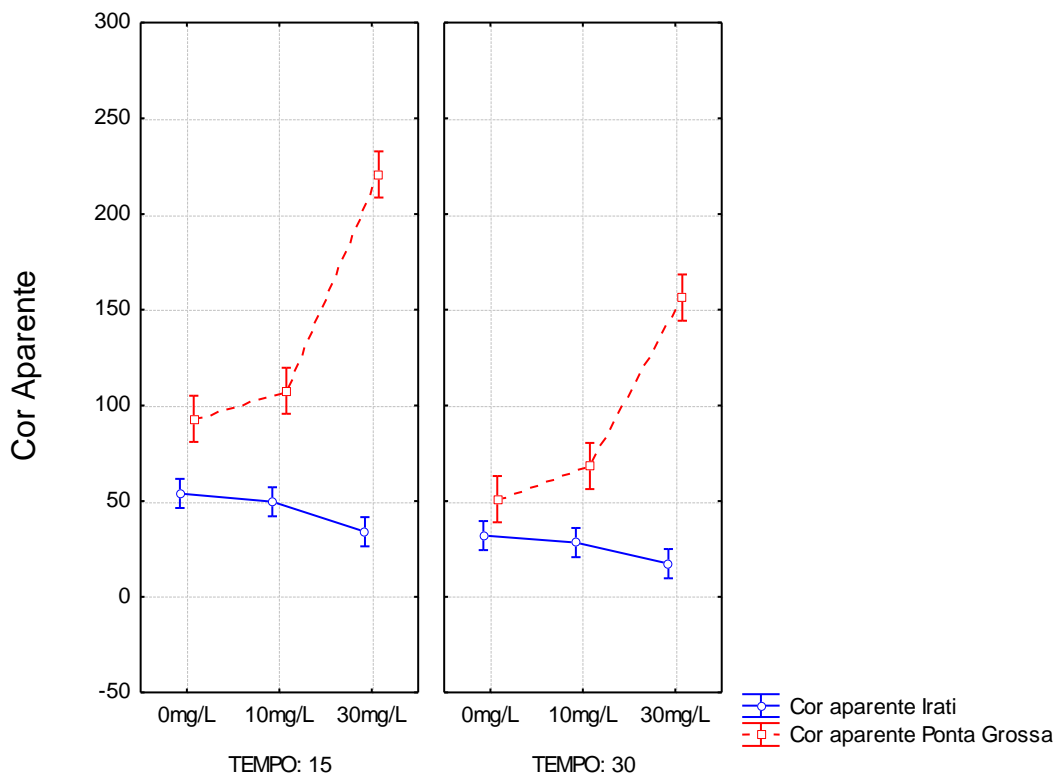
Tabela 16- Médias e desvio padrão de cor aparente das amostras de ALF de Irati e Ponta Grossa nos ensaios utilizando coagulante recuperado de lodo de decantador, após os dois tempos de sedimentação estudados.

| Concentração de coagulante | Tempo de 15 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 30 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 15 minutos (IRATI) | Tempo de 30 minutos (IRATI) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0 mg/L | 93±11,790 | 51±3 | 54,00±2,00 | 32,00±4,00 |
| Com 10 mg/L | 107,667±0,577 | 68,333±14,572 | 49,667±7,572 | 28,333±5,859 |
| Com 30mg/L | 220,667±10,263 | 156±9,238 | 34,00±10,149 | 17,333±1,528 |

Fonte: A Autora, 2023.

Na sequência, na Figura 17 consta um gráfico que ilustra os resultados derivados das análises conduzidas com diferentes dosagens empregadas do coagulante recuperado na remoção de cor aparente.

Figura 17- Gráfico referente aos resultados de cor aparente do coagulante recuperado do lodo do decantador com efluente de Irati e Ponta Grossa.



Fonte: A Autora, 2023.

As Tabelas 17 e 18 apresentam os resultados derivados da aplicação do teste de Tukey e as taxas percentuais de eficácia correspondentes a cada dosagem empregada, tanto para o efluente proveniente de Irati quanto para o de Ponta Grossa.

Tabela 17 -Teste Tukey (alpha=0,05) para a resposta cor aparente do efluente da Eta Irati e Ponta Grossa, segundo fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação.

| TESTE TUKEY TURBIDEZ PG e IRATI | | | | | |
|---------------------------------|---------|--------------------|----|-------------|-----|
| TEMPO | DOSAGEM | MÉDIA Ponta Grossa | | MÉDIA IRATI | |
| 30 | Sem | 51,0000 | e | 32,0000 | bcd |
| 15 | Sem | 93,0000 | cd | 54,0000 | a |
| 30 | 10mg/L | 68,3333 | de | 28,3333 | bcd |
| 15 | 10mg/L | 107,6667 | c | 49,6667 | ab |
| 30 | 30mg/L | 156,3333 | b | 17,3333 | d |
| 15 | 30mg/L | 220,6667 | a | 34,0000 | bc |

Fonte: A Autora, 2023.

*Médias seguidas com letras diferentes se diferem, conforme teste de Tukey com 5% de significância.

Quando feito os testes de ANOVA, é observado que para a amostra proveniente de Irati ocorre influência tanto para tempo quanto para dosagem ($f_{tempo} = 49,00$ e $p < 0,01$; $f_{dosagem} = 13,48$ e $p < 0,01$), porém entre os fatores não ocorre interação significativa ($f = 0,34$ e $p = 0,71$). Já para a amostra de Ponta Grossa ocorre também influência tanto para tempo como para dosagem ($f_{tempo} = 115,46$ e $p < 0,01$; $f_{dosagem} = 260,4$ e $p < 0,01$), porém o mesmo não ocorre entre os fatores.

Tabela 18 – Eficiência decorridas do tempo de sedimentação referente a cor aparente ao efluente de Irati e Ponta Grossa com coagulante recuperado.

| Dosagem | TEMPO | | | |
|---------|-----------------|-----------------|----------|----------|
| | 15 Ponta Grossa | 30 Ponta Grossa | 15 IRATI | 30 IRATI |
| 0mg/L | 71,47% | 84,35% | 96,52% | 97,94% |
| 10 mg/L | 66,97% | 79,04% | 96,79% | 98,17% |
| 30 mg/L | 32,31% | 52,15% | 97,81% | 98,88% |

Fonte: A Autora, 2023.

De acordo com Rocha *et al*, (2019), em um trabalho realizado utilizando 10mg/L de coagulante recuperado a eficiência no seu tratamento ficou entre 60 a 90% de eficiência para remoção de cor aparente e turbidez, o que ocasionou esta instabilidade foram os diferentes efluentes.

Quanto aos resultados observados para as dosagens de 10mg/L, empregadas na presente pesquisa, os mesmos exibem similaridades, mantendo-se dentro da faixa

de variação de 60% a 90% no que diz respeito à eficiência de remoção. Além disso, uma correspondência também é notada na variação do pH, onde a introdução do coagulante recuperado por meio de uma abordagem ácida ocasiona a redução do pH. Nesse contexto, surge a necessidade de utilizar os agentes alcalinizantes para elevar o pH, a fim de estabelecer um valor próximo ou equivalente a 7.

Nos experimentos realizados utilizando o coagulante recuperado, todas as variáveis investigadas indicam que sem a adição de coagulante, os resultados obtidos foram altamente favoráveis. Portanto, é plausível afirmar que a adição de coagulantes com o intuito de reduzir a cor aparente e a turbidez não se mostra necessária, dado que a sedimentação por si só resultou em desempenho satisfatório.

Para outra parte do estudo foi utilizado o coagulante policloreto de alumínio (PAC), neste produto consta em seu rótulo as seguintes especificações: teor de óxido de alumínio (%) 10,58 e especificação de no mínimo 10,50; teor de basicidade (%) 61,38 e especificação de no mínimo 60,00; teor de cloretos (%) 12,21 e especificação de no máximo 15,00; pH (pH) de 2,54, especificação de no mínimo 2,20 e no máximo 3,00; densidade a 20° C (g/cm^3) 1,258 e especificação de no mínimo 1,250 e no máximo 1,310; e insolúveis (%) 0,01 e especificação no máximo 0,10.

Portanto, no experimento que foi conduzido pelo o policloreto de alumínio (PAC) foi observada uma diminuição no valor de pH. Assim, quando comparado ao coagulante recuperado, a magnitude da diminuição foi inferior. Essa observação é corroborada pela informação apresentada na Tabela 19 que segue.

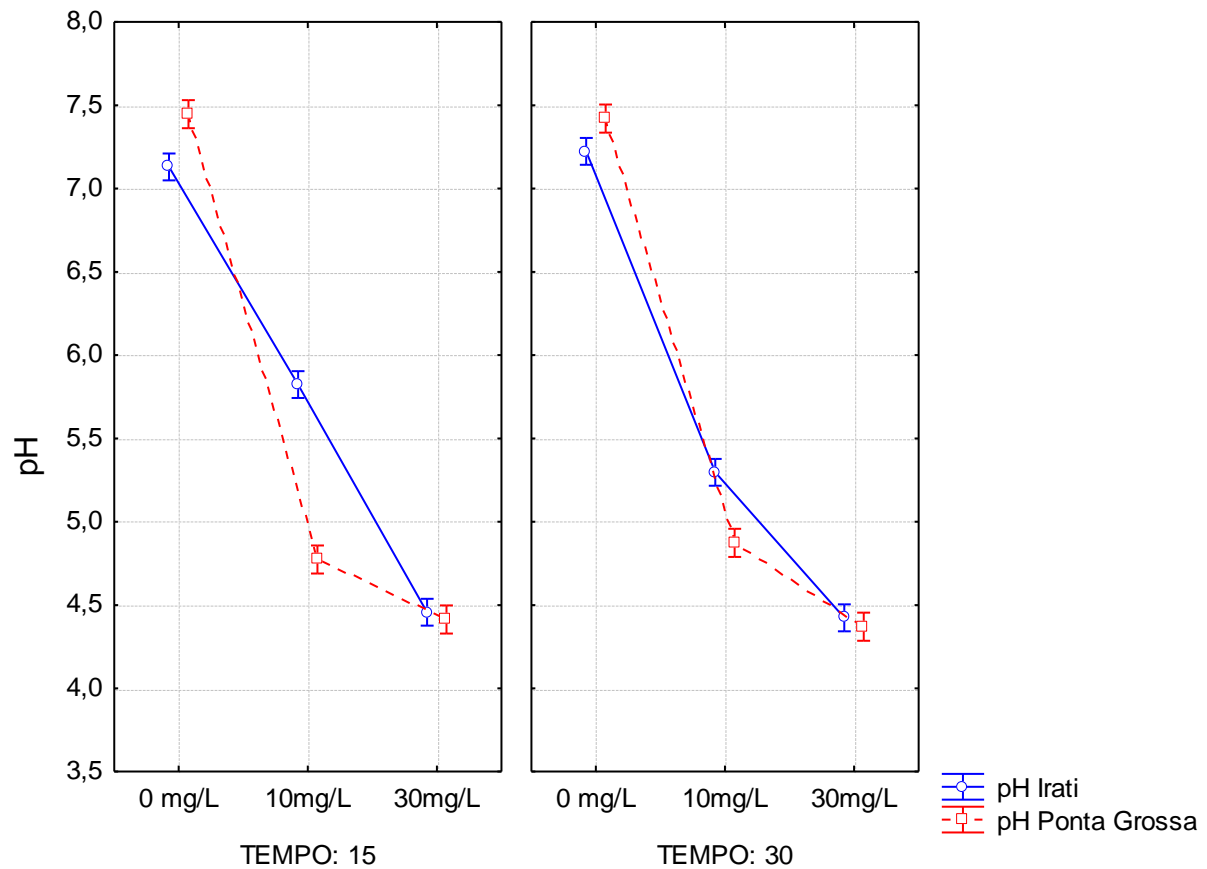
Tabela 19- referente aos resultados de pH do coagulante comercial PAC com resíduos de Irati e Ponta Grossa

| Concentração de coagulante | Tempo de 15 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 30 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 15 minutos (IRATI) | Tempo de 30 minutos (IRATI) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0 mg/L | 7,447±0,006 | 7,420±0,026 | 7,130±0,010 | 7,223±0,006 |
| Com 10 mg/L | 4,773±0,064 | 4,873±0,131 | 5,823±0,099 | 5,297±0,097 |
| Com 30mg/L | 4,413±0,049 | 4,3710±0,052 | 4,457±0,023 | 4,423±0,070 |

Fonte: A Autora, 2023.

A Figura 18 ilustra de maneira gráfica os resultados decorrentes das análises laboratoriais realizadas empregando o coagulante policloreto de alumínio (PAC). Por outro lado, a Tabela 20 apresenta de forma tabular os resultados obtidos através do teste de Tukey aplicado a este tratamento específico.

Figura 18- Gráfico referente aos resultados de pH do coagulante comercial PAC resíduos de Irati e Ponta Grossa.



Fonte: A Autora, 2023.

Tabela 20 -Teste Tukey (alpha=0,05) para a resposta pH do efluente da Eta Irati e Ponta Grossa, segundo fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação.

| TESTE TUKEY PH Ponta Grossa e IRATI | | | | | |
|-------------------------------------|---------|--------------------|---|-------------|---|
| TEMPO | DOSAGEM | MÉDIA Ponta Grossa | | MÉDIA IRATI | |
| 30 | Sem | 7,42000 | a | 7,22333 | a |
| 15 | Sem | 7,44667 | a | 7,13000 | a |
| 30 | 10mg/L | 4,87333 | b | 5,29667 | c |
| 15 | 10mg/L | 4,77333 | b | 5,82333 | b |
| 30 | 30mg/L | 4,37000 | c | 4,42333 | d |
| 15 | 30mg/L | 4,41333 | c | 4,45667 | d |

Fonte: A Autora, 2023.

*Médias seguidas com letras diferentes se diferem, conforme teste de Tukey, com 5% de significância.

Ao conduzir as análises de variância (ANOVA), para a amostra de Irati todos tiveram influência significativa tanto referente ao tempo quando a dosagem ($f_{tempo} =$

26,4 e $p < 0,01$; $f_{dosagem} = 2751,4$ e $p < 0,01$), e entre os fatores ocorre também interação ($f = 39,0$ e $p < 0,01$). Já com a amostra de Ponta Grossa com o tempo não ocorreu influência significativa ($f_{tempo} = 0,1$ e $p = 0,75$) para a dosagem ocorre influência significativa $f_{dosagem} = 3606,7$ e $p < 0,01$), e entre os fatores não obteve interação ($f = 2,0$ e $p = 0,17$).

Ao proceder à caracterização dos efluentes, constatou-se que os valores iniciais de turbidez para a água de lavagem proveniente do filtro de Irati situaram-se em $200,3 \pm 66,3$, enquanto para a água de lavagem do filtro de Ponta Grossa, os valores foram de $33,7 \pm 7$, indicando uma significativa disparidade entre os parâmetros observados nos dois tipos de efluente.

Conforme evidenciado na Tabela 21, os valores de turbidez obtidos para dosagens de 0 mg/L, em um intervalo de 15 minutos, obtiveram uma média de $6,940 \pm 1,266$ para o resíduo proveniente de Ponta Grossa, enquanto para o resíduo de Irati, a média de remoção de turbidez foi de $5,847 \pm 0,311$ uT. É notável que essa redução já se situa abaixo do limiar de 10 uT, caracterizando um resultado favorável. Ao prolongar o intervalo para 30 minutos, observa-se uma melhoria considerável, uma vez que todos os valores de turbidez se situaram abaixo de 5 uT, porém, esta água é para reuso e não para consumo.

Tabela 21- Médias e desvio padrão de turbidez das amostras de ALF de Irati e Ponta Grossa nos ensaios utilizando coagulante comercial PAC, após os dois tempos de sedimentação estudados

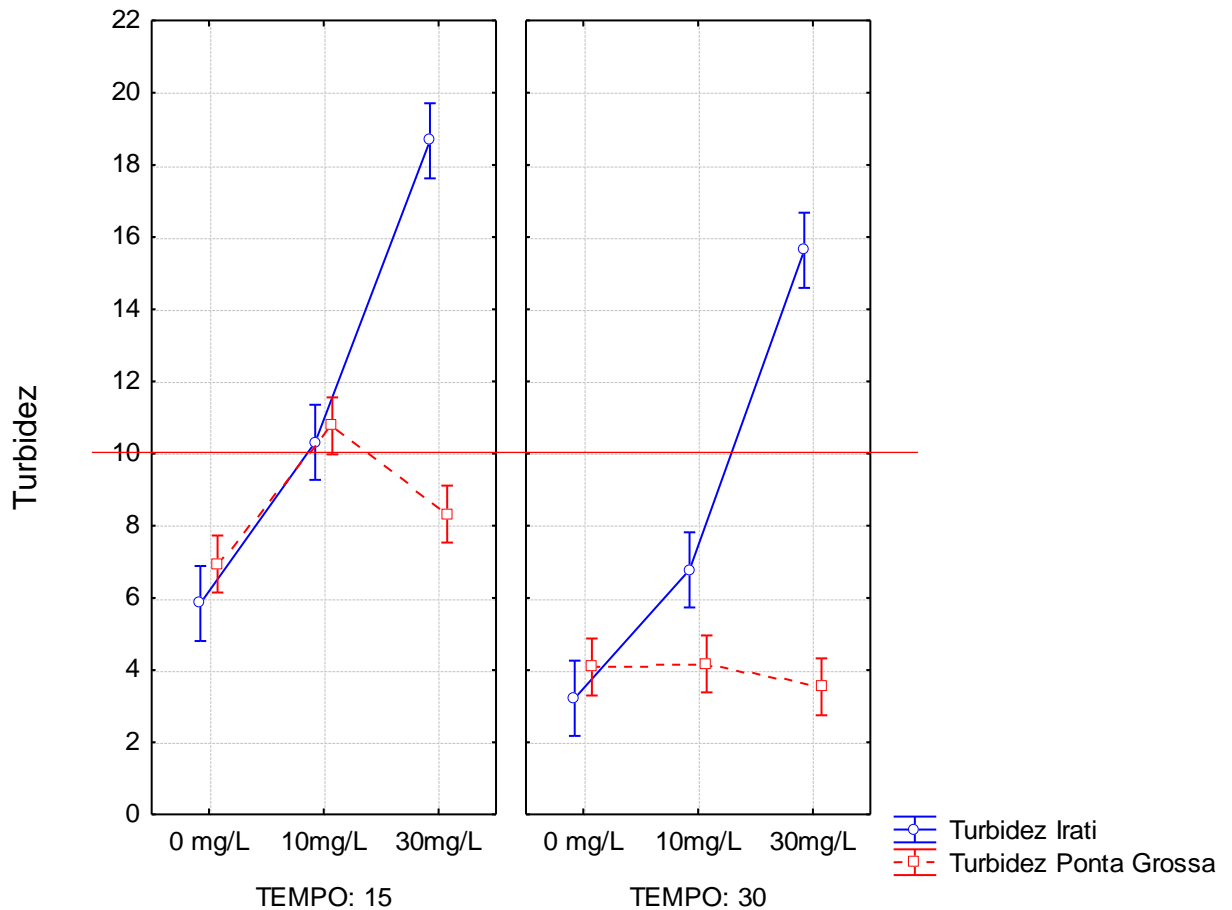
| Concentração de coagulante | Tempo de 15 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 30 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 15 minutos (IRATI) | Tempo de 30 minutos (IRATI) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0 mg/L | $6,940 \pm 1,266$ | $4,087 \pm 0,194$ | $5,847 \pm 0,311$ | $3,220 \pm 0,069$ |
| Com 10 mg/L | $10,767 \pm 0,379$ | $4,173 \pm 0,611$ | $10,313 \pm 0,480$ | $6,777 \pm 1,694$ |
| Com 30mg/L | $8,323 \pm 0,411$ | $3,537 \pm 0,205$ | $18,667 \pm 0,874$ | $15,633 \pm 0,379$ |

Fonte: A Autora, 2023.

Para as outras dosagens testadas, foi observado que a dosagem de 10 mg/L apresentou o melhor resultado. Essa dosagem comprovou uma tendência de redução da turbidez, conforme ilustrado na Figura 19. Por outro lado, a dosagem de 30 mg/L apresentou resultados elevados apenas no efluente de Ponta Grossa. No entanto, para o outro efluente, os resultados foram semelhantes para ambos os tempos de sedimentação, e a turbidez não se apresentou abaixo de 15 uT.

No contexto das diferentes avaliações de dosagens, destaca-se que a concentração de 10 mg/L se manifestou como a mais eficaz. Esta concentração evidenciou uma inclinação consistente em direção à redução da turbidez, conforme claramente ilustrado na Figura 19. Contrastando com tal resultado, a dosagem de 30 mg/L exibiu níveis elevados de turbidez somente no efluente de Ponta Grossa. Entretanto, para o outro efluente, os processos foram análogos para ambos os períodos de sedimentação, com os valores de turbidez mantendo-se acima de 15 unidades de turbidez. E na Tabela 22 estão os resultados do teste Tukey realizados para este parâmetro.

Figura 19- Gráfico referente aos resultados de turbidez do coagulante comercial PAC efluente de Irati e Ponta Grossa.



Fonte: A Autora, 2023.

Segundo as investigações conduzidas por Zand e Hoveidi (2015), a dosagem ótima de policloreto de alumínio (PAC) para o parâmetro de turbidez foi estabelecida em 10mg/L. Contudo, ao empregar dosagens alternativas de 10 a 20mg/L e de 20 a

30mg/L, os níveis de remoção demonstraram falta de significância, indicando que a eficiência na eliminação de turbidez manteve-se relativamente constante em todos os intervalos de dosagem acima de 10mg/L. O estudo realizado por Zand e Hoveidi (2015), foram reproduzidos em um equipamento de bancada o Jar-test, porém os estudos foram realizados com água sintética.

Tabela 22 -Teste Tukey ($\alpha=0,05$) para a resposta turbidez do efluente da ETA Irati e Ponta Grossa, segundo fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação.

| TESTE TUKEY TURBIDEZ Ponta Grossa e Irati PAC | | | | | |
|---|---------|--------------------------|---|----------------|---|
| TEMPO | DOSAGEM | MÉDIA Ponta Grossa | | MÉDIA IRATI | |
| 30 | Sem | 4,08667 | c | 3,22000 | e |
| 15 | Sem | 6,94000 | b | 5,84667 | d |
| 30 | 10mg/L | 4,17333 | c | 6,77667 | d |
| 15 | 10mg/L | 10,76667 | a | 10,31333 | c |
| 30 | 30mg/L | 3,53667 | c | 15,63333 | b |
| 15 | 30mg/L | 8,32333 | b | 18,66667 | a |

Fonte: A Autora, 2023.

*Médias seguidas com letras diferentes se diferem, conforme teste de Tukey, com 5% de significância.

Os resultados obtidos para o teste realizado com a amostra de Irati mostra que teve influência tanto para o tempo quanto para a dosagem ($f_{tempo} = 61,74$ e $p < 0,01$; $f_{dosagem} = 364,01$ e $p < 0,01$), e entre os fatores não ocorreu interação ($f = 0,45$ e $p = 0,64$). E para Ponta Grossa ocorre influencia tanto para tempo quanto dosagem ($f_{tempo} = 256,77$ e $p < 0,01$; $f_{dosagem} = 16,16$ e $p < 0,01$), e entre os fatores ocorre interação também ($f = 13,30$ e $p < 0,01$).

No que se refere à eficiência de remoção, verificou-se que o efluente proveniente de Ponta Grossa apresentou taxas de remoção situadas na faixa de 60% a 90%. Por outro lado, com base nos dados da Tabela 23, o outro efluente exibiu taxas de remoção superiores a 90%. Esses resultados indicam que o ensaio no qual nenhum coagulante foi adicionado resultou no melhor desempenho em termos de eficiência, evidenciando uma remoção mais expressiva dos parâmetros analisados.

Isso sugere que a natureza intrínseca do efluente, possivelmente caracterizada por sua composição química específica, pode estar desempenhando um papel crucial na efetividade do processo de remoção, tornando desnecessária a adição de coagulante para atingir altos níveis de remoção.

De acordo com as análises realizadas por Zand e Hoveidi (2015), a aplicação do policloreto de alumínio (PAC) alcançou um nível de eficiência de remoção de até 93% no que se refere à turbidez no efluente estudado.

Por último, no contexto das investigações relativas ao parâmetro de turbidez como mostrado da tabela 23, na concentração de 0mg/L, os resultados obtidos para ambos os efluentes foram notavelmente favoráveis. Tanto nos intervalos de tempo de 15 minutos quanto de 30 minutos, os resultados demonstraram que o processo de sedimentação por si só desempenha um papel significativo na redução da turbidez dos efluentes analisados, tendo uma eficiência de até 98,39% de remoção.

Tabela 23 – Eficiência decorridas do tempo de sedimentação referente a turbidez ao efluente de Irati e Ponta Grossa com PAC.

| Dosagem | TEMPO | | | |
|---------|-----------------|-----------------|----------|----------|
| | 15 Ponta Grossa | 30 Ponta Grossa | 15 IRATI | 30 IRATI |
| 0mg/L | 79,41% | 87,87% | 97,08% | 98,39% |
| 10 mg/L | 68,05% | 87,62% | 94,85% | 96,62% |
| 30 mg/L | 75,30% | 89,50% | 90,68% | 92,19% |

Fonte: A Autora, 2023.

Durante o processo de caracterização, foi identificado que o valor inicial do parâmetro de cor aparente para o efluente proveniente de Irati situou-se em 1550 unidades de cor (uC), enquanto para o efluente proveniente de Ponta Grossa, essa medição foi registrada 326 uC. A tabela 24, evidencia que a remoção da cor aparente é viável dentro do escopo do estudo em questão.

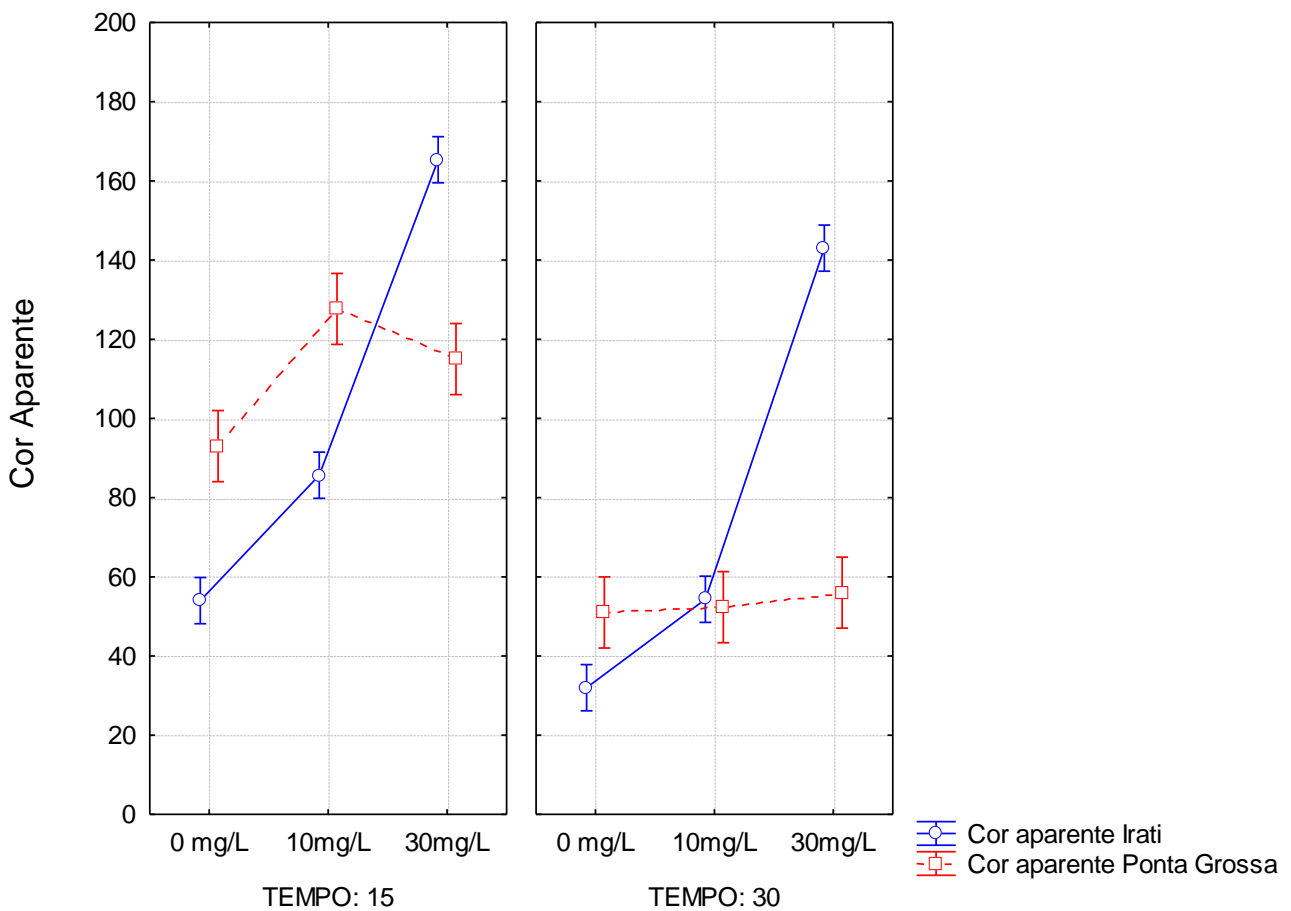
Tabela 24 - Médias e desvio padrão de cor aparente das amostras de ALF de Irati e Ponta Grossa nos ensaios utilizando coagulante comercial PAC, após os dois tempos de sedimentação estudados

| Concentração de coagulante | Tempo de 15 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 30 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 15 minutos (IRATI) | Tempo de 30 minutos (IRATI) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0 mg/L | 93±11,79 | 51±3 | 54,00±2,646 | 32,00±4,00 |
| Com 10 mg/L | 127,67±9,074 | 52,33±4,163 | 85,667±4,726 | 54,333±2,309 |
| Com 30mg/L | 115±7 | 56±3 | 165,333±6,506 | 143,00±6,00 |

Fonte: A Autora, 2023.

Nesta pesquisa, é observável que o ensaio sem coagulação apresenta resultados de perspectiva mais favoráveis em comparação com as outras dosagens. Em contraste, uma dosagem de 30 mg/L resultou em valores elevados para o parâmetro de cor aparente. A representação gráfica dos valores adquiridos é delineada na Figura 20 subsequente, fornecendo uma exposição mais precisa desses resultados e na Tabela 25 está expresso os resultados do teste de Tukey.

Figura 20- Gráfico referente aos resultados de cor aparente do coagulante comercial PAC efluente de Irati e Ponta Grossa



Fonte: A Autora, 2023.

Tabela 25 -Teste Tukey ($\alpha=0,05$) para a resposta cor aparente do efluente da ETA Irati e Ponta Grossa, segundo fatores dosagem do coagulante e tempo de sedimentação.

| TESTE TUKEY COR APARENTE Ponta Grossa e Irati PAC | | | | | |
|---|---------|--------------------|---|-------------|---|
| TEMPO | DOSAGEM | MÉDIA Ponta Grossa | | MÉDIA IRATI | |
| 30 | Sem | 51,0000 | c | 32,0000 | e |
| 15 | Sem | 93,0000 | b | 54,0000 | d |
| 30 | 10mg/L | 52,3333 | c | 54,3333 | d |
| 15 | 10mg/L | 127,6667 | a | 85,6667 | c |
| 30 | 30mg/L | 56,0000 | c | 143,0000 | b |
| 15 | 30mg/L | 115,0000 | a | 165,3333 | a |

Fonte: A Autora, 2023.

*Médias seguidas com letras diferentes se diferem, conforme teste de Tukey.

Ao conduzir os testes de análise de variância (ANOVA), obteve influência significativa para tempo e dosagem da amostra de Irati ($f_{tempo} = 133,15$ e $p < 0,01$; $f_{dosagem} = 938,18$ e $p < 0,01$), entre os fatores não ocorreu interação ($f = 1,96$ e $p = 0,18$). E para a amostra de Ponta Grossa ocorreu influencia tanto no tempo como na dosagem ($f_{tempo} = 305,17$ e $p < 0,01$; $f_{dosagem} = 10,33$ e $p < 0,01$), e também teve interação entre ambos fatores, ($f = 8,18$ e $p < 0,01$).

Na Tabela 26 apresentada abaixo encontra-se a descrição da eficácia de eliminação da cor aparente em relação à aplicação do coagulante PAC comercial. Para a dosagem de 0 mg/L, a eficácia situa-se na faixa de 70 a 98% de redução, enquanto em outras concentrações do coagulante ela varia de 60 a 97%.

Tabela 26 – Eficiência decorridas do tempo de sedimentação referente a cor aparente ao efluente de Irati e Ponta Grossa com PAC.

| Dosagem | TEMPO | | | |
|---------|-----------------|-----------------|----------|----------|
| | 15 Ponta Grossa | 30 Ponta Grossa | 15 IRATI | 30 IRATI |
| 0mg/L | 71,47% | 84,35% | 96,52% | 97,94% |
| 10 mg/L | 60,84% | 83,95% | 94,47% | 96,49% |
| 30 mg/L | 64,72% | 82,82% | 89,33% | 90,77% |

Fonte: A Autora, 2023.

Adicionalmente, de acordo com os dados apresentados na Tabela 26, as condições mais propícias para a diminuição da cor aparente são aquelas que empregam uma concentração de coagulante de 0mg/L, tanto para o efluente proveniente de Irati quanto para o originário de Ponta Grossa. Isso evidencia que o processo de sedimentação isoladamente é capaz de atingir resultados altamente satisfatórios, sem a necessidade de incorrer em custos adicionais para aquisição de coagulantes.

5.5 ENSAIOS MICROBIOLÓGICO DE ESCHERICHIA COLI, COLIFORMES TOTAIS E ESPOROS DE BACTERIAS AERÓBIAS

No contexto do ensaio microbiológico realizados com a ALF da Estação de Tratamento de Água (ETA) em Ponta Grossa, os resultados preliminares indicam que, para o indicador coliformes totais (C.T.) a medição inicial sem a aplicação de coagulante foi de 247×10^1 UFC/100mL, enquanto para a bactéria Escherichia coli (E.C.) o valor aferido consumido 2×10^1 UFC/100mL e para esporos de bactéria aeróbias (EBA) a contagem atingiu 17×10^1 UFC/100mL. Para o efluente proveniente de Irati as concentrações iniciais foram diferentes, para o indicador de coliformes totais (C.T.) exibiu uma média de 304×10^1 UFC/100mL, a bactéria Escherichia coli (E.C.), atingiu uma contagem de 82×10^1 UFC/100mL e os esporos de bactéria aeróbias (EBA) demonstraram uma contagem de 282×10^1 UFC/100mL.

As Tabelas 27 a 32 a seguir apresentam de forma detalhada os resultados obtidos a partir das intervenções realizadas com o coagulante recuperado, o coagulante comercial e a ausência de coagulante.

Tabela 27 - Referente aos resultados de CT do coagulante comercial PAC efluente de Irati e Ponta Grossa

| Concentração de coagulante | Tempo de 15 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 30 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 15 minutos (IRATI) | Tempo de 30 minutos (IRATI) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 0 mg/L | $317,7 \times 10^1 \pm 25,0$ | $288,97 \times 10^1 \pm 33,1$ | $188,77 \times 10^1 \pm 152,5$ | $5441,77 \times 10^1 \pm 4431,2$ |
| Com 10 mg/L | $281,77 \times 10^1 \pm 37,5$ | $332,27 \times 10^1 \pm 25$ | $30937 \times 10^1 \pm 4249,9$ | $53527 \times 10^1 \pm 4586,5$ |
| Com 30mg/L | $292,27 \times 10^1 \pm 47,4$ | $303,37 \times 10^1 \pm 21,7$ | $85,77 \times 10^1 \pm 9,8$ | $364,77 \times 10^1 \pm 368,9$ |

Fonte: A Autora, 2023.

Tabela 28 - Referente aos resultados de E. Coli do coagulante comercial PAC efluente de Irati e Ponta Grossa

| Concentração de coagulante | Tempo de 15 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 30 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 15 minutos (IRATI) | Tempo de 30 minutos (IRATI) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 0 mg/L | $4,77 \times 10^1 \pm 2,1$ | $6,07 \times 10^1 \pm 4,4$ | $5,37 \times 10^1 \pm 4,0$ | $30 \times 10^1 \pm 28$ |
| Com 10 mg/L | $16,07 \times 10^1 \pm 7,5$ | $9,77 \times 10^1 \pm 3,2$ | $72,37 \times 10^1 \pm 63,1$ | $4,37 \times 10^1 \pm 3,2$ |
| Com 30mg/L | $15,37 \times 10^1 \pm 3,1$ | $6,07 \times 10^1 \pm 2,0$ | $12,37 \times 10^1 \pm 5,0$ | $11,77 \times 10^1 \pm 7,6$ |

Fonte: A Autora, 2023.

Tabela 29 - Referente aos resultados de EBA do coagulante comercial PAC efluente de Irati e Ponta Grossa

| Concentração de coagulante | Tempo de 15 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 30 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 15 minutos (IRATI) | Tempo de 30 minutos (IRATI) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 0 mg/L | 281,6x10 ¹ ±N.I | 260x10 ¹ ±N.I | 2447x10 ¹ ±297,8 | 295,77x10 ¹ ±233,3 |
| Com 10 mg/L | 541,67x10 ¹ ±234,4 | 570,57x10 ¹ ±294,2 | 245,77x10 ¹ ±152 | 123,07x10 ¹ ±12,1 |
| Com 30mg/L | 325,07x10 ¹ ±156,2 | 281,77x10 ¹ ±99,3 | 231,37x10 ¹ ±33,2 | 223,07x10 ¹ ±50,2 |

Fonte: A Autora, 2023.

Tabela 30 - Referente aos resultados de CT do coagulante RECUPERADO efluente de Irati e Ponta Grossa

| Concentração de coagulante | Tempo de 15 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 30 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 15 minutos (IRATI) | Tempo de 30 minutos (IRATI) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 0 mg/L | 317,77x10 ¹ ±25,0 | 288,97x10 ¹ ±33,1 | 188,77x10 ¹ ±152,5 | 5441,77x10 ¹ ±4431,2 |
| Com 10 mg/L | 430,77x10 ¹ ±968,9 | 264,37x10 ¹ ±172,7 | 204,77x10 ¹ ±135,7 | 112,77x10 ¹ ±147,0 |
| Com 30mg/L | 301,07x10 ¹ ±171,9 | 278,77x10 ¹ ±141,1 | 38,77x10 ¹ ±18,6 | 18,37x10 ¹ ±14,0 |

Fonte: A Autora, 2023.

Tabela 31 - Referente aos resultados de E. Coli do coagulante RECUPERADO efluente de Irati e Ponta Grossa

| Concentração de coagulante | Tempo de 15 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 30 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 15 minutos (IRATI) | Tempo de 30 minutos (IRATI) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0 mg/L | 4,77x10 ¹ ±2,1 | 6,07x10 ¹ ±4,4 | 5,37x10 ¹ ±4,0 | 30x10 ¹ ±28 |
| Com 10 mg/L | 3,37x10 ¹ ±2,1 | 1,37x10 ¹ ±0,6 | 6,37x10 ¹ ±1,2 | 3,77x10 ¹ ±5,5 |
| Com 30mg/L | 1,07x10 ¹ ±1,0 | 0,77x10 ¹ ±0,6 | 6,77x10 ¹ ±4,7 | 2,37x10 ¹ ±2,5 |

Fonte: A Autora, 2023.

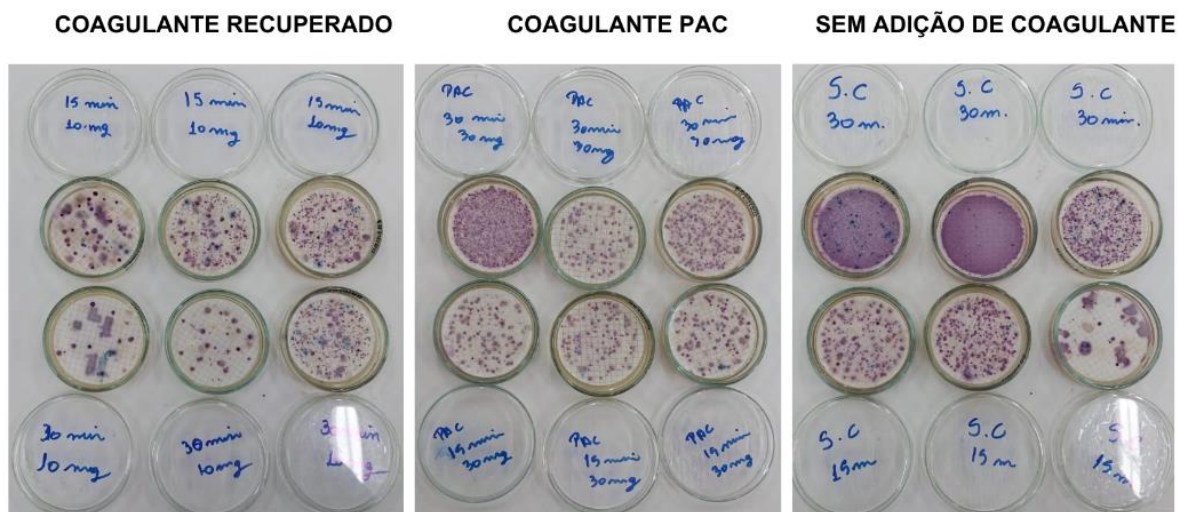
Tabela 32 - Referente aos resultados de EBA do coagulante RECUPERADO efluente de Irati e Ponta Grossa

| Concentração de coagulante | Tempo de 15 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 30 minutos (Ponta Grossa) | Tempo de 15 minutos (IRATI) | Tempo de 30 minutos (IRATI) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0 mg/L | 281,6x10 ¹ ±N.I | 260x10 ¹ ±N.I | 2447x10 ¹ ±297,8 | 295,77x10 ¹ ±233,3 |
| Com 10 mg/L | 173,07x10 ¹ ±43,0 | 144,37x10 ¹ ±24,8 | 367,07x10 ¹ ±272,9 | 306,77x10 ¹ ±466,5 |
| Com 30mg/L | 180,37x10 ¹ ±25,4 | 137,07x10 ¹ ±12,1 | 364,77x10 ¹ ±420,5 | 102,37x10 ¹ ±115,2 |

Fonte: A Autora, 2023.

Ao realizar uma análise comparativa, observe-se que o coagulante policloreto de alumínio (PAC), no que diz respeito ao parâmetro microbiológico CT (Coliformes totais), não fornece grandes remoções em comparação com o coagulante recuperado. Em relação à bactéria *Escherichia coli* os resultados apresentam uma pequena remoção para ambos os coagulantes utilizados. A figura 21, mostra alguns resultados alcançados após a utilização dos coagulantes e sem a adição também.

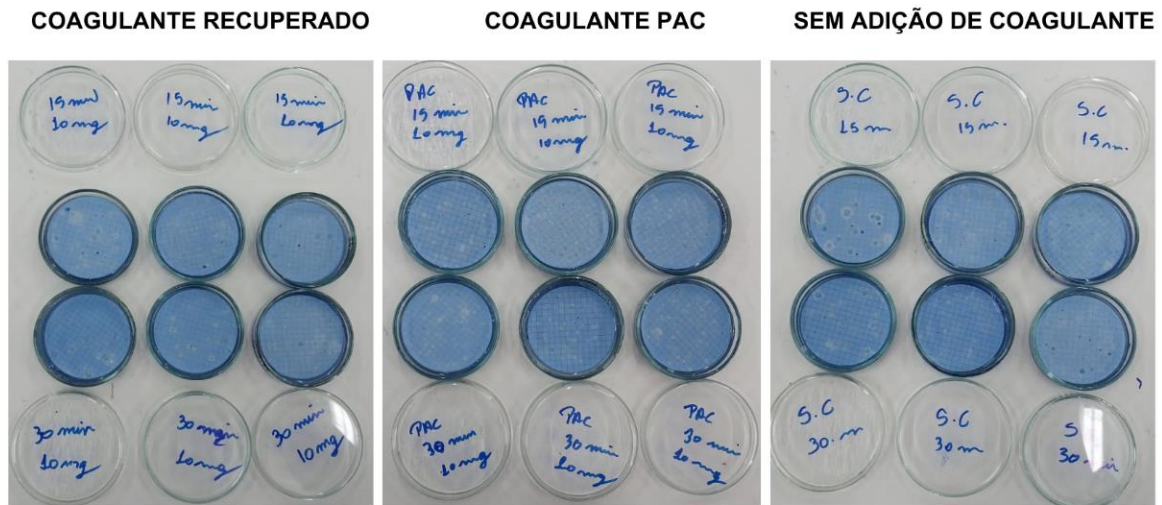
Figura 21- Imagens demonstram alguns dos resultados obtidos quando aplicados coagulante recuperado, PAC e sem o uso do coagulante para os microrganismos.



Fonte: A Autora, 2023.

Por fim, no ensaio de esporos de bactérias aeróbias (EBA), é notável que, no teste sem coagulante ocorreu uma remoção de 87,91% entre os tempos de 15 minutos e 30 minutos, referente ao efluente de Irati. Contudo, quando utilizado o coagulante recuperado no efluente de Ponta Grossa, a remoção não ocorreu satisfatoriamente, atingindo apenas 7,68%. Esses resultados evidenciam a diferença de eficiência dos coagulantes testados em relação à remoção de contaminantes microbiológicos, bem como a influência das características específicas de cada efluente na evolução do processo de coagulação. A Figura 22, mostra alguns dos resultados referentes aos esporos de bactérias aeróbias (EBA), realizado após utilização do coagulante recuperado, PAC e sem a adição.

Figura 22- Imagens demonstram alguns dos resultados obtidos quando aplicados coagulante recuperado, PAC e sem o uso do coagulante para EBA.



Fonte: A Autora, 2023.

Portanto, para melhorar a eficácia da remoção bacteriana, é necessário conduzir experimentos adicionais com o intuito de alcançar uma remoção completa das bactérias mencionadas.

6 CONCLUSÃO

Para o trabalho apresentado e como resultados alcançados ocorrem as seguintes conclusões:

- Os resultados obtidos neste estudo indicam que o lodo proveniente de Irati apresentou elevado potencial para produção de coagulante recuperado, obtendo-se de 3.821 mg/L de Al. Por outro lado, o coagulante derivado do lodo decantador de Ponta Grossa apresentou uma concentração mais baixa de 355,15 mg/L de Al no processo de regeneração, mas ainda assim apresentou bons resultados.
- No que diz respeito à tratabilidade das ALF analisadas, o uso do coagulante recuperado permitiu alcançar elevada eficiência na remoção da turbidez. Para a ALF de Irati, a dosagem de 10 mg/L do coagulante resultou em uma eficiência de remoção de 96,91% em 15 minutos de sedimentação. Conclui-se, portanto, que o uso de uma dosagem menor resulta em eficiência semelhante a dosagem maior, além de reduzir o consumo de coagulante.
- Uma observação importante é que para a ALF de Irati, a dosagem de 0 mg/L, ou seja, sem a adição de coagulante, também resultou em remoção satisfatória da turbidez, equivalente à dosagem de 10 mg/L. Em 15 minutos de sedimentação, a eficiência de remoção foi de 97,08%, e em 30 minutos, foi de 98,39%. Portanto, nesse caso a sedimentação simples já é suficiente para um bom desempenho do tratamento de ALF.
- No caso do efluente de Ponta Grossa os resultados indicaram uma diferença na turbidez em comparação ao de Irati, com uma eficiência menor. Para uma dosagem de 10 mg/L, a eficiência de remoção da turbidez foi de 72,40% em 10 minutos e 86,48% em 30 minutos. Já para a dosagem de 30 mg/L, a remoção foi menos satisfatória, com 50,35% em 15 minutos e 68,84% em 30 minutos.
- No que se refere à cor aparente, ambos os coagulantes apresentaram alto potencial de remoção. No resíduo de Irati, a água de lavagem inicial estava com 1.550 uC, e com uma dosagem de 10 mg/L do coagulante comercial PAC, os resultados foram de 85,67 uC em 15 minutos e 54,33 uC em 30 minutos.
- A dosagem de 30 mg/L resultou em valores mais elevados de cor aparente devido à deposição de cor pelo coagulante. Para o resíduo de Ponta Grossa, a cor aparente inicial foi de 326 uC, um valor menor em comparação ao de Irati.

Com uma dosagem de 10 mg/L do coagulante PAC, os resultados foram de 127,67 uC em 15 minutos e 52,33 uC em 30 minutos.

- O coagulante recuperado apresentou resultados bons na remoção da cor aparente. Para a ALF de Irati, uma dosagem de 10 mg/L resultou em 49,67 uC em 15 minutos e 28,33 uC em 30 minutos. Para a ALF de Ponta Grossa, os resultados foram de 107,67 uC em 15 minutos e 68,33 uC em 30 minutos. Assim, obteve-se um melhor resultado para o efluente de Irati.
- Já para os ensaios microbiológicos os resultados obtidos não foram satisfatórios, portanto, sendo necessário novos estudos e a realização de novos experimentos para a eliminação completa das mesmas.

Por fim, é considerado que o processo de coagulação, floculação e sedimentação com a utilização do coagulante recuperado pode representar uma alternativa viável para o tratamento da água de lavagem de filtro, visando sua recirculação em estações de tratamento de água.

Além disso, no caso em que o objetivo se restringe à diminuição dos parâmetros de cor aparente e turbidez, a aplicação exclusiva do processo de sedimentação manifestou resultados notáveis para ambos, tanto no efluente oriundo de Irati quanto no proveniente de Ponta Grossa.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10004 Resíduos sólidos – Classificação, 2004. disponível em :< <https://analiticagmcredidos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf> >. Acesso em :24 de abril 2023.

ACHON C.L.; BARROSO M.M.; CORDEIRO J.S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. Eng Sanit Ambient | v.18 n.2 | abr/jun 2013 | 115-122. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/ZXVPPthHjP6NZ6HgN8rMD7s/?format=pdf&lang=pt> : Acesso em: 20 de jun. 2022.

American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA); Water Environment Federation (WEF). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd Edition. Washington, DC: APHA, AWWA, WEF, 2017.

BATISTA I. F.; MICHELAN D. C. DE G. S.; JESUS É. P. S.; NILIN J.; Contribuição potencial do lodo da estação de tratamento de água (ETA) para a poluição do rio. Scientia Plena , v. 17, n. 10 de 2021. Acesso em 05 de mai.2023.

BRAGA, M. D.; BEVILACQUA, P. D.; BASTOS, R. K.X. Caracterização microbiológica da água de lavagem de filtros e avaliação de diferentes cenários de recirculação. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica Volumen 1, número 3, año 2007 ISSN 0718-378X PP. Disponível em :< <file:///C:/Users/user/Downloads/bgr,+14421-14473-1-CE.pdf>>: Acesso em 27 de abril de 2023.

BRASIL.(1997) Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Política nacional de recursos hídricos. Disponível em :< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm>: Acesso em: 20 de jun.2022.

BRASIL. (2010), Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política dos resíduos sólidos. Disponível em :< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>: Acesso em 24 de abril de 2023.

BRASIL, (1998), Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Política de crime Ambientais. Disponível em :< https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm>: Acesso em 24 de abril de 2023.

BRATBY, J.; Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment. IWA publishing Alliance ouse, London 2016. Disponível em :< https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=PabQDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=t2eQMndiE2&sig=FkLkX2_zpZq8G23A3UTzIHoYExE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false>: Acesso 20 de ago. 2023.

CONAMA, 357/2005, Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em :<

http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf:> Acesso em 26 de jul.2023.

CONAMA 430/2011, Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em :< <https://www.suape.pe.gov.br/pt/publicacoes/245-resolucao/185-conama-n-430-de-2011?layout=publicacoes>:> Acesso em 26 de jul. de 2023

DANDOLINI, I.; Reciclagem do lodo de estação de tratamento de água- Produção de coagulante por lixiviação acida. Porto Alegre 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. disponível em :< <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127899>>: Acesso em 10 de abril de 2023.

DI BERNARDO, L., DANTAS, A.D.B., VOLTAN, P.E.N. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2012.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P.L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: RiMa, 2002.

DI BERNARDO, L., DANTAS, A.D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2012.

DI BERNARDO, L.; SCALIZE, P. S.; II-023 - Caracterização da água de lavagem de filtros rápidos de estações de tratamento de água e dos sobrenadantes e sedimentos obtidos após ensaios de clarificação utilizando polímero aniônico. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.

GUIMARÃES, N. C.; Recuperação de Coagulante a partir da Acidificação de Resíduos Gerados na Estação de Tratamento de Água do Rio Manso. Belo Horizonte 2005. Universidade Federal de Minas Gerais Programa de pós-graduação em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos. Disponível em :< <https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/176M.PDF>>: Acesso 16 jan 2023.

Jung KW, Hwang MJ, Park DS, Ahn KH. Comprehensive reuse of drinking water treatment residuals in coagulation and adsorption processes. J Environ Manage. 2016 Oct 1;181:425-434. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.06.041. Epub 2016 Aug 5. PMID: 27420166.

Keeley, J.; Jarvis P.; Judd SJ. Coagulant Recovery from Water Treatment Residuals: A Review of Applicable Technologies. Crit Rev Environ Sci Technol. 2014 Dec 17;44(24):2675-2719. doi: 10.1080/10643389.2013.829766. PMID: 26064036; PMCID: PMC4440624.

Keeley J, Smith, A. D.; Judd, S.; Jarvis, P. Reuse of recovered coagulants in water treatment: An investigation on the effect coagulant purity has on treatment performance. Separation and Purification Technology Volume 131, 27 June 2014, Pages 69-78.

Komorowska-Kaufman M, Toczek M. Recirculation of Backwash Water in the Water Treatment Plant for the Needs of the Combined Heat and Power Plant Journal of Ecological Engineering 2022, 23(11), 41–48
<https://doi.org/10.12911/22998993/153394> ISSN 2299–8993, License CC-BY 4.0

Mangesh L. Jibhakate. et al. Reuse & Recirculation of Filter Backwash Water of Water Treatment Water. Int. Journal of Engineering Research and Application www.ijera.com ISSN : 2248-9622, Vol. 7, Issue 4, (Part -1) April 2017, pp.60-63

Libânio, Marcelo Fundamentos de qualidade e tratamento de água/Marcelo Libânio. -
- Campinas, SP: Editora Átomo, 2010.3a Edição

MOHAMMED EVUTI, A.; LAWAL, M.; Recovery of coagulants from water works sludge: A review. Pelagia Research Library Advances in Applied Science Research, 2011, 2 (6):410-417. disponível em :<
<https://www.primescholars.com/articles/recovery-of-coagulants-from-water-works-sludge-a-review.pdf>>: Acesso em 19 de abril de 2023.

Monteiro, N. B.; Características de lodos de estações de tratamento de água desidratados por sistema geotêxtil: um estudo de caso / Natali Barbosa Monteiro. – Recife, 2014. Disponível em
:<<https://attena.ufpe.br/bitstream/123456789/14983/1/disserta%20natali.%20FINAL.pdf>> Acesso em 28 de jul. 2023.

OLINGER, C.; Caracterização e clarificação por sedimentação da água de lavagem de filtro rápido de uma estação de tratamento de água. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2002. disponível em :<
<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/83820>>: Acesso em 10 de abril de 2023.

Puriwater, Policloreto de Alumínio. Disponível em :<
<https://www.purewaterrefluentes.com.br/produtos/policloreto-de-aluminio-pac-coagulante.html>>: Acesso em 05 de mai. de 2023.

PROSAB, Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final / Cleverson Vitório Andreoli (coordenador). -- Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. Projeto PROSAB.

Rocha, V.V.F, dos Santos, I.F.S, Silva, AM.L et al. Clarificação de águas de alta turbidez: uma comparação de Moringa oleifera e coagulantes à base de sulfato de alumínio virgem e recuperado. Environ Dev Sustain 22, 4551–4562 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00397-2>

SAE SUPERINTENDÊNCIA DE ÁGUA E ESGOTO. Decantador da ETA passa por limpeza periódica para manter a qualidade da água. São Paulo,2021. Disponível em

:<<https://sae-ourinhos.com.br/2021/02/04/decantador-da-eta-passa-por-limpeza-periodica-para-manter-a-qualidade-da-agua/>> :> Acesso em 20 jan.2023

SCALIZE, P. S.; CARACTERIZAÇÃO E CLARIFICAÇÃO POR SEDIMENTAÇÃO DA ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTROS RÁPIDOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA QUE UTILIZAM SULFATO DE ALUMÍNIO COMO COAGULANTE PRIMÁRIO. JANEIRO DE 1997. DISPONÍVEL EM :<
https://www.researchgate.net/publication/204261505_Caracterizacao_e_clarificacao_por_sedimentacao_da_agua_de_lavagem_de_filtros_rapidos_de_estacoes_de_tratamento_de_agua_que_utilizam_sulfato_de_aluminio_como_coagulante_primario>:
ACESSO EM 25 DE ABRIL DE 2023.

SILVA JUNIOR, I. C; HARAGUCHI, M. T.; UCKER, F. E.; BORBA, W. F.; KEMERICH, P. D. C.; Avaliação dos sistemas de reutilização da água de lavagem dos filtros de uma estação de tratamento de água: estudo de caso, Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa MariaRevista Monografias Ambientais - REMOAE-ISSN 2236 1308 - V. 13, N. 5 (2014): Edição Especial LPMA/UFSM, p. 3713-3717. Disponível em :<
<https://periodicos.ufsm.br/index.php/remoa/article/view/14057>>: Acesso em 26 de abril de 2023.

SILVA, ET AL, 2012. Classificação dos lodos formados durante o processo de coagulação/floculação da água com os coagulantes PAC e Moringa Oleífera, ENGVISTA. Disponível em :<<https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/8917>>:
Acesso em 10 de abril de 2023.

USEPA, United States Environmental Protection Agency, Filter Backwash Recycling Rule Technical Guidance Manual, Dezembro 2002.

ZAND, A. D.; HASSAN HOVEIDI, H.; Comparing Aluminium Sulfate and Poly-Aluminium Chloride (PAC) Performance in Turbidity Removal from Synthetic Water. Journal of Applied Biotechnology Reports, 12/2015. Disponível em :<
https://www.biotechrep.ir/article_69189_15e78418c10724dd9a027deb22e59857.pdf>
: Acesso em 26 de jul.2023.