



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

LEONARDO SOUZA DE FIGUEREDO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEDIMENTAÇÃO NO DESAGUAMENTO DO
LODO DE ETA**

PALMAS

2021

LEONARDO SOUZA DE FIGUEREDO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEDIMENTAÇÃO NO DESAGUAMENTO DO
LODO DE ETA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel no Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva.

PALMAS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

F475a Figueredo, Leonardo Souza de
 Avaliação do desempenho da sedimentação no desaguamento
 do lodo de ETA / Leonardo Souza de Figueredo. – Palmas, TO, 2021.
 99 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2021.

Orientador: Dr. Giulliano Guimarães Silva

1. Adensamento. 2. Sedimentação. 3. Desaguamento. I. Silva,
Giulliano Guimarães. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

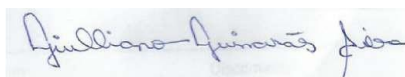
LEONARDO SOUZA DE FIGUEREDO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEDIMENTAÇÃO NO DESAGUAMENTO DO LODO DE ETA

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do curso de Engenharia Civil do
Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas,
como exigência à obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em: 03 / 12 / 2021

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Giuliano Guimarães Silva
Orientador – IFTO



Andréia Cintra Braga Frota
Examinador – EXTERNO



Gabriel Antônio Ribeiro Souza
Examinador – EXTERNO

Dedico este trabalho a Deus, meu criador
e à minha família por toda ajuda prestada.

Gratidão eterna!

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, por fazer com que meus sonhos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos e por todas as bênçãos a mim proporcionadas.

Aos meus pais, Gilmar e Maria Helena e meus irmãos Gláucia, Bráulio e Higor, por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuíram para a realização deste sonho.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil do IFTO, pelos conhecimentos e experiências compartilhados ao longo da graduação.

Ao professor Dr. Giulliano Guimarães Silva, por ter sido meu orientador neste trabalho.

Aos companheiros de laboratório Cayo Nunes, Pedro Filipe, Rafaella Neres e Wendel Sousa por toda a dedicação e comprometimento na realização deste trabalho e pelos dias que convivemos no laboratório como se nos conhecêssemos a muito tempo.

Aos meus amigos de turma Gabriel, Gabryelle, Leonardo, Magno, Paulo, Pedro, por compartilharem comigo tantos momentos de amizade e aprendizado e por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

A todos os demais amigos e familiares que direta e indiretamente me apoiaram.

RESUMO

FIGUEREDO, Leonardo Souza. **Avaliação do desempenho da sedimentação no desaguamento do lodo de ETA.** 2021. 99 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2021.

No processo de produção de água tratada, as estações de tratamento de água (ETAs) produzem resíduos, entre eles, o lodo, que apresenta características distintas a depender do tipo de água bruta, produtos químicos usados, limpeza dos decantadores e lavagem dos filtros. É preciso fazer uma gestão sustentável do lodo de ETA (LETA) e reduzir os custos operacionais, e para isso, a técnica de adensamento é uma boa opção, pois permite aumentar a concentração de sólidos, reduzir o volume de água no lodo e otimizar os equipamentos de desaguamento. Todavia, esta eficiência está associada às características do resíduo, aos métodos de adensamento e dos tipos de polímeros que serão aplicados. O presente trabalho avaliou o desempenho da Sedimentação no processo de Adensamento do LETA de uma ETA do tipo Dupla Filtração ao aplicar polímeros de diferentes cargas através da metodologia estatística de RSM. A metodologia RSM apresentou eficiência para o planejamento experimental dos ensaios. De início, o LETA foi caracterizado para que fossem realizados ensaios de bancada para avaliação da Turbidez do Sobrenadante e as Velocidades de Clarificação e de Sedimentação. Avaliou-se o uso de três tipos de polímeros (catiônico, aniônico e não-iônico). A adição de polímero apresentou eficiência na remoção da turbidez superior a 90%, e aumentou a Velocidade de Sedimentação e de Clarificação.

Palavras-Chave: Adensamento. Desaguamento. Lodo de ETA. Polímeros. Sedimentação.

ABSTRACT

FIGUEREDO, Leonardo Souza. **Evaluation of sedimentation performance in the dewatering of ETA sludge.** 2021. 99 p. Course Conclusion Paper - Bachelor of Civil Engineering - Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins. Palmas, 2021.

In the process of producing treated water, the water treatment plants (WTP) produce residues, including sludge, which has different characteristics depending on the type of raw water, chemical products used, decanters cleaning and filter washing. It is necessary to make a sustainable management of Water Treatment Sludge and reduce operating costs, and for this, the thickening techniques are a good option, as it allows to increase the concentration of solids, reduce the volume of water in the sludge and optimize the dewatering equipment. However, this efficiency is associated with the characteristics of the residue, the thickening methods and the types of polymers that will be applied. The present work evaluated the performance of sedimentation in the process of sludge thickening in a Double Filtration WTP when applying polymers of different loadings through the RSM statistical methodology. The RSM methodology presented efficiency for the experimental planning of the trials. Initially, the WTP Sludge was characterized so that bench tests were performed to assess the Turbidity of the Supernatant and the Clarification and Sedimentation Speeds. The use of three types of polymers (cationic, anionic and non-ionic) was evaluated. The addition of polymer showed efficiency in the removal of turbidity greater than 90% and increases the Clarification and Sedimentation Speed.

Keywords: Thickening. Dewatering. WTP Sludge. Polymers. Sedimentation.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	<i>American Public Health Association</i>
AWWA	<i>American Water Works Association</i>
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
COT	Carbono Orgânico Total
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DFI	Descarga de Fundo
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Efluente
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
FAP	Filtro Ascendente com Pedregulho
FRD	Filtro Rápido Descendente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
L/s	Litro por segundo
LETA	Lodo de Estação de Tratamento de Água
Mg/kg	Miligrama por quilo
mg/L	Miligrama por litro
mL	Mililitro
NBR	Norma Brasileira
nm	Nanomilímetro
NMP	Número Mais Provável
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PAC	Cloreto de Polialumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
%	Porcentagem
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SST	Sólidos Suspensos Totais
Tr	Taxa de Recirculação de Água
Vcl	Velocidade de Clarificação
Vsd	Velocidade de Sedimentação/Adensamento
μ T	Unidade de Turbidez
WTP	<i>Water Treatment Plant</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema ilustrativo da distribuição da água no lodo.....	26
Figura 2: Fluxograma do Tratamento por Dupla Filtração	30
Figura 3: Representação esquemática dos Polímeros Aniônicos, Não Iônicos e Catiônicos	33
Figura 4: Relação entre pH e dosagem de coagulantes entre os Polímeros Aniônicos e Não-Iônicos	36
Figura 5: Fluxograma de Pesquisa Proposta	39
Figura 6: Coleta das Amostras	43
Figura 7: Esquemático dos Ensaios de Adensamento e FAD	47
Figura 8: Etapas dos Ensaios de Adensamento por Gravidade	49
Figura 9: Amostra Composta - Água de Estudo	54
Figura 10: Adensamento por Gravidade - Turbidez Remanescente no LETA.....	55
Figura 11: Turbidez Remanescente - Adensamento por Gravidade.....	56
Figura 12: Superfícies de resposta da Turbidez Remanescente - Adensamento por Gravidade.....	58
Figura 13: Superfícies de resposta da VCI - Adensamento por Gravidade	62
Figura 14: Superfícies de resposta da Vsd - Adensamento por Gravidade.....	63
Figura 15: Curvas de Adensamento por Gravidade - Polímero Catiônico	64
Figura 16: Curvas de Adensamento por Gravidade - Polímero Aniônico	64
Figura 17: Curvas de Adensamento por Gravidade - Polímero Não-Iônico.....	65
Figura 18: Adensamento por Gravidade – Velocidade de Clarificação	66
Figura 19: Adensamento por Gravidade – Velocidade de Sedimentação	67
Figura 20: Valores Experimentais <i>versus</i> Valores Preditos do modelo matemático para a Turbidez do Sobrenadante no Adensamento por Gravidade com Polímero Catiônico	83
Figura 21: Valores Experimentais <i>versus</i> Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por Gravidade com Polímero Catiônico	85
Figura 22: Valores Experimentais <i>versus</i> Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Sedimentação no Adensamento por Gravidade com Polímero Catiônico	87

Figura 23: Valores Experimentais <i>versus</i> Valores Preditos do modelo matemático para a Turbidez do Sobrenadante no Adensamento por Gravidade com Polímero Aniônico	89
Figura 24: Valores Experimentais <i>versus</i> Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por Gravidade com Polímero Aniônico	91
Figura 25: Valores Experimentais <i>versus</i> Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Sedimentação no Adensamento por Gravidade com Polímero Aniônico	93
Figura 26: Valores Experimentais <i>versus</i> Valores Preditos do modelo matemático para a Turbidez do Sobrenadante no Adensamento por Gravidade com Polímero Não-lônico.....	95
Figura 27: Valores Experimentais <i>versus</i> Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por Gravidade com Polímero Não-lônico.....	97
Figura 28: Valores Experimentais <i>versus</i> Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Sedimentação no Adensamento por Gravidade com Polímero Não-lônico	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Equipamentos de Ensaio.....	40
Quadro 2: Características dos Polímeros.....	44
Quadro 3: DCCR – Entrada de variáveis Qualitativas e Quantitativas	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Metais encontrados em lodo de ETAs que utilizam Alumínio e Ferro	28
Tabela 2: Parâmetros, Métodos e Limites de Detecção segundo APHA (2017).....	42
Tabela 3: Procedimento de Coleta de Amostras.....	43
Tabela 4: Variáveis de análise para o Adensamento por Gravidade	46
Tabela 5: Planejamento Experimental - Adensamento por Gravidade	46
Tabela 6: Caracterização físico-química da Água de Estudo.....	52
Tabela 7: Turbidez do Sobrenadante - DCCR do Adensamento por Gravidade.....	56
Tabela 8: Análise p-valor da Turbidez - Adensamento por Gravidade.....	57
Tabela 9: V_{Cl} e V_{sd} - DCCR Adensamento por Gravidade	60
Tabela 10: Velocidades de Clarificação e Sedimentação - Análise p-valor	60
Tabela 11: Tsd e Eficiência de Remoção: Adensamento por Gravidade - Polímero Aniônico	69
Tabela 12: Resultados da Regressão da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Catiônico – Adensamento por Gravidade.....	82
Tabela 13: Análise de Variância da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Catiônico – Adensamento por Gravidade.....	82
Tabela 14: Resultados da Regressão da Velocidade de Clarificação com Polímero Catiônico – Adensamento por Gravidade.....	84
Tabela 15: Análise de Variância da Velocidade de Clarificação com Polímero Catiônico – Adensamento por Gravidade.....	84
Tabela 16: Resultados da Regressão da Velocidade de Sedimentação com Polímero Catiônico – Adensamento por Gravidade.....	86
Tabela 17: Análise de Variância da Velocidade de Sedimentação com Polímero Catiônico – Adensamento por Gravidade.....	86
Tabela 18: Resultados da Regressão da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Aniônico – Adensamento por Gravidade.....	88
Tabela 19: Análise de Variância da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Aniônico – Adensamento por Gravidade.....	88
Tabela 20: Resultados da Regressão da Velocidade de Clarificação com Polímero Aniônico – Adensamento por Gravidade.....	90
Tabela 21: Análise de Variância da Velocidade de Clarificação com Polímero Aniônico – Adensamento por Gravidade.....	90

Tabela 22: Resultados da Regressão da Velocidade de Sedimentação com Polímero Aniônico – Adensamento por Gravidade	92
Tabela 23: Análise de Variância da Velocidade de Sedimentação com Polímero Aniônico – Adensamento por Gravidade	92
Tabela 24: Resultados da Regressão da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Não-Iônico – Adensamento por Gravidade	94
Tabela 25: Análise de Variância da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Não-Iônico – Adensamento por Gravidade	94
Tabela 26: Resultados da Regressão da Velocidade de Clarificação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por Gravidade	96
Tabela 27: Análise de Variância da Velocidade de Clarificação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por Gravidade	96
Tabela 28: Resultados da Regressão da Velocidade de Sedimentação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por Gravidade	98
Tabela 29: Análise de Variância da Velocidade de Sedimentação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por Gravidade	98

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 PROBLEMA DE PESQUISA	20
3 JUSTIFICATIVA.....	21
4 OBJETIVOS.....	22
4.1 Objetivo Geral.....	22
4.2 Objetivos Específicos.....	22
5 REVISÃO DE LITERATURA	23
5.1 Resíduos produzidos em ETAs	23
5.1.1 Origem dos resíduos produzidos em ETAs.....	23
5.1.2 Análise Qualitativa do Lodo Gerado em ETA.....	25
5.2 ETAs de Dupla Filtração	29
5.3 Tecnologias de Adensamento do Lodo	30
5.3.1 Adensamento por Gravidade ou Sedimentação	31
5.4 Polímeros.....	33
5.4.1 Polímeros Catiônicos	35
5.4.2 Polímeros Aniônicos	35
5.5.3 Polímeros Não Iônicos	36
5.5 Legislação e Aspectos ambientais	37
6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	39
6.1 Caracterização da Área de Estudo	40
6.2 Equipamentos e Métodos Analíticos.....	40
6.2.1 Caracterização da Água de Estudo	41
6.2.2 Coleta das Amostras.....	42
6.3 Polímeros.....	44
6.4 Programa de Ensaios	44
6.4.1 Planejamento de Experimentos - DOE	44
6.4.2 Ensaios de Adensamento	47
6.4.2.1 Adensamento por Gravidade	47
6.4.3 Análise de dados	50
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
7.1 Água de Estudo.....	52
7.2 Ensaios de Bancada	54
7.2.1 Turbidez do Sobrenadante	55

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
REFERÊNCIAS.....	71
APÊNDICE.....	81

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de reduzir o volume dos resíduos gerados, as técnicas de adensamento oferecem variedades para a implantação de melhorias na gestão do lodo gerado nos processos de tratamento da água. O adensamento, ganha destaque com a função de proporcionar o aumento da concentração de sólidos do lodo por meio da redução do volume de água presente e, consequentemente, otimizar a eficiência dos equipamentos de desaguamento (REALI, 1999).

A gestão do lodo de estação de tratamento de água (LETA) ganhou atenção apenas no final da década de 1990 devido às restrições criadas no que diz respeito ao gerenciamento desses resíduos e aumento de responsabilidades dos gestores do saneamento em que tiveram que tomar novas medidas quanto à disposição desse resíduo no meio ambiente (LUSTOSA *et al*, 2016). No entanto, ainda é comum que sejam encontrados lançamentos indevidos em corpos hídricos. Cordeiro (1999) e Guimarães (2007) enfatizam que, devido a estas práticas, os LETAs representam os principais impactos ambientais gerados durante a operação de uma ETA, afetando, por exemplo, a reprodutibilidade da biota.

O LETA apresenta várias características e são caracterizados especialmente pela qualidade e quantidade da água bruta, pela capacidade da ETA e pelos produtos químicos utilizados nos processos. Segundo Cornwell *et. al* (1987, *apud* DI BERNARDO; PAZ, 2008), este resíduo é oriundo principalmente dos processos de sedimentação e de lavagem dos filtros.

Dentre as tecnologias de tratamento disponíveis, duas merecem destaque, por serem as mais usuais: Ciclo Completo e Dupla Filtração. Essas unidades representam aproximadamente 50% das estações de tratamento de água ativas no país (SENS *et al*, 2009). De acordo com DI BERNARDO *et al* (2002), os volumes de lodo gerados em estações do tipo Dupla Filtração são caracterizados pela filtração direta ascendente e descendente, e sua produção é restrita às lavagens e descargas de fundo dos filtros.

Conforme dados do SNIS (BRASIL, 2020), as ETAs no Brasil tratam cerca de $13,4 \times 10^9$ m³ de água. Desse montante, 0,42% (ou $56,3 \times 10^6$ m³) correspondem ao total produzido no Tocantins. Se for considerado apenas as ETAs Não-Convencionais, o que representa cerca de 32% segundo o PNSB (IBGE, 2021), estima-se que as

unidades em operação do Estado do Tocantins podem alcançar uma produção de lodo de $1,44 \times 10^6$ ton/ano.

Para Katayama (2012), parte do lodo gerado nas estações de tratamento de água (ETAs) no Brasil é disposto em rios ou em aterros sanitários. Tal prática, acontece devido aos altos custos operacionais. Todavia, as companhias têm buscado a redução dos seus custos operacionais e existe uma pressão dos agentes reguladores por meio de leis e instruções normativas para uma gestão mais sustentável do lodo. Assim, ganham destaque ações com objetivo de otimizar os processos em uma unidade de tratamento, sendo elas: a redução do volume de lodo produzido e a adoção de novas estratégias para disposição do lodo gerado nos processos de tratamento.

Essa pesquisa, retrata a relação entre a produção de água potável e a otimização das perdas que ocorrem no decorrer do processo. Segundo (BOURGEOIS, 2013), otimizar perdas no processo é reduzir o volume de lodo à proporção que é aumentada a quantidade de água produzida. Cordeiro (1999) ressalta a relevância na redução do volume não apenas no que diz respeito à produção de água, mas também a respeito dos custos operacionais relacionados ao transporte e à disposição dos resíduos que são de difícil manejo. Tal redução ocorre, principalmente, durante a fase de adensamento do lodo. Ainda, segundo Cordeiro (2001) 95% do lodo é formado por água em excesso.

Di Bernardo e Paz (2008) e Ferreira Filho (2017) ressaltam que os principais métodos de adensamento utilizados são o Adensamento Mecanizado, a Sedimentação e a Flotação por Ar Dissolvido (FAD), sendo a Sedimentação a analisada com mais detalhe na presente pesquisa. Cordeiro (1999) alega que o processo de adensadores por gravidade (sedimentação) é o mais antigo e difundido entre as ETAs. Hedlund (2016), Di Bernardo e Paz (2008) destacam as principais vantagens da sedimentação: eficiência no adensamento de lodos de abrandamento de água, pois sedimentam com facilidade; não necessita de pessoal qualificado. Contudo, comparado com outras técnicas de adensamento, precisa de grandes áreas para ser implantado.

Para Guimarães (2007), a eficácia de uma metodologia de adensamento depende da quantidade de água bruta captada; das características particulares do processo, como o tipo de condicionamento, a janela de operação, o método de limpeza dos decantadores e dos filtros. Com base nessas razões, fez-se o seguinte

questionamento para desenvolver esse trabalho: *Qual a influência do tipo de condicionamento e da qualidade da água bruta na definição do método de adensamento do lodo de uma ETA de Dupla Filtração?*

Dessa forma, esta pesquisa é pautada na avaliação do desempenho da sedimentação nos processos de adensamento em estações com tecnologia do tipo Dupla Filtração.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

Com o intuito de buscar soluções para os problemas enfrentados nas companhias de saneamento no país, busca-se avaliar o desempenho da sedimentação no desaguamento do lodo de ETA com o seguinte questionamento: Qual a influência do tipo de condicionamento e da qualidade da água bruta na definição do método de adensamento do lodo de uma ETA de Dupla Filtração?

3 JUSTIFICATIVA

As estações de tratamento de água (ETAs) no processo de produção de água potável geram uma elevada quantidade de resíduos sólidos que devem ser transportados até um destino final. Concomitante a isso, há o incremento populacional que requer uma maior quantidade de água tratada para consumo e, conseqüentemente, mais lodo é produzido. Ainda, existe a deterioração dos mananciais devido à poluição e contaminação provocada pelo homem, a qual é outro fator que corrobora para a geração de lodo, pois surge a necessidade de dosagens maiores de produtos químicos na etapa de clarificação.

Há algumas alternativas tecnológicas que podem ser adotadas nas ETAs, dentre elas: melhorar a qualidade da água distribuída para as pessoas e minimizar a produção dos resíduos para garantir menor produção de lodos (VERRELLI *et al.*, 2010). Conforme a Portaria GM/MS Nº 888 (BRASIL, 2021) a água destinada para consumo humano deve atender a parâmetros de potabilidade, sendo eles, físicos, químicos e microbiológicos. O tratamento da água bruta busca essa proteção contra microrganismos, remoção de matéria orgânica e substâncias tóxicas, qualidade estética e proteção da rede de distribuição contra corrosão e contaminação (BONTON *et al.*, 2012).

Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011), não apenas a qualidade da água bruta e sua qualidade pós tratamento devem ser observados, mas também outros fatores determinam a escolha da tecnologia de tratamento adequada, como: disponibilidade de recurso; disponibilidade de material de construção e de produtos químicos; qualificação dos colaboradores para a construção; operação e manutenção; capacidade da estação; condições socioeconômicas e posição geográfica da população; custo benefício.

O tratamento predominante do Brasil é o convencional (Ciclo Completo), composto de: coagulação; floculação; decantação; filtração e desinfecção. Ainda, pode existir a substituição da etapa da sedimentação pela flotação, ou outro tipo de filtração, como a dupla filtração. Segundo Hedlund (2016), o adensamento por gravidade (sedimentação) é o método mais usado no Brasil e tem eficácia no tratamento de resíduos de estações de tratamento de água (RETAs). Portanto, surge a necessidade de estudos e pesquisas para avaliar métodos para reduzir o volume de lodo.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho do método de sedimentação no processo de adensamento do lodo a partir da qualidade da água bruta e do condicionamento do lodo gerado em uma ETA de Dupla Filtração.

4.2 Objetivos Específicos

- Verificar a influência das características qualitativas da água no adensamento por Sedimentação;
- Avaliar o efeito do tipo de coagulante na eficiência do adensamento;
- Analisar as condições operacionais para a sedimentação do LETA em diferentes concentrações.

5 REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Resíduos produzidos em ETAs

5.1.1 Origem dos resíduos produzidos em ETAs

O LETA constitui-se, principalmente, no subproduto dado para a água bruta através da utilização de coagulantes ou abrandadores quando há a necessidade de remoção da dureza da água. Dependendo dos compostos químicos utilizados no tratamento, a parcela pode corresponder a até 92% do volume de lodo gerado segundo mostra os estudos de Sens *et al* (2003) *apud* Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012). Os principais fatores desse subproduto são formados pelos compostos orgânicos e inorgânicos presentes na água bruta, concentração dos químicos aplicados no processo de potabilidade, tempo de permanência do lodo nos tanques e a eficiência da sedimentação.

Cordeiro (1999) frisa a influência da sazonalidade do manancial na variação dessas características e na qualidade do lodo produzido. Já Fontana (2004) destaca a influência das condições operacionais de limpeza dos decantadores e a forma de lavagem dos filtros.

Mesmo que apresente alta quantidade de água, a parcela sólida do lodo é que determina o volume e a massa de resíduo produzido. Essas partículas são sujeitas aos processos e operações de formação dos flocos que se desenvolverão por meio da flotação ou da sedimentação (CORDEIRO, 2001).

Qualquer que seja a tecnologia de processo utilizada no tratamento da água bruta, o produto final será: a água tratada e os LETAs. Ao passo que a água tratada é produzida segundo padrões de potabilidade presentes na Portaria GM/MS Nº 888 (BRASIL, 2021), as características do lodo gerado serão decorrentes do tipo de tratamento e do coagulante químico usado no processo de tratamento (PEREIRA S, 2011).

A água bruta apresenta características intrínsecas (tipo de solo, uso e ocupação da bacia e características do corpo receptor). Além dessas características, o incremento dos químicos no processo de tratamento, quer para ajuste de pH quer para auxílio nos processos de sedimentação, contribui de maneira mais significativa no manejo do lodo a partir do uso dos coagulantes, em que os mais utilizados são

formados por sais de ferro ou alumínio que ao serem misturados na água, formam flocos.

Os LETAs não podem ser lançados diretamente nos corpos hídricos, pois apresentam grandes quantidades de concentrações de íons metálicos, além de restrições ambientais. De acordo com Pereira S. (2011), os metais pesados afetam a capacidade de autodepuração dos corpos hídricos, pois estes produtos são inibidores dos microrganismos que fazem a recomposição da matéria orgânica.

Os LETA's podem ser divididos em quatro grandes categorias (ASCE; AWWA; EPA, 1996 apud FERREIRA FILHO, 2017):

I - LETAs com origem nos processos de tratamento de água para a remoção de cor e turbidez, sendo proveniente dos decantadores ou dos processos de lavagem dos filtros;

II - LETAs sólidos gerados no decorrer dos processos de abrandamento;

III - LETAs gerados em processos de tratamento não convencionais em busca de reduzir os compostos orgânicos da água bruta (carvão ativado granular saturado, ar proveniente de processos de arraste com ar, entre outros);

IV - LETAs líquidos gerados no decorrer dos processos voltados à redução de compostos inorgânicos presentes na água bruta, como por exemplo os processos de membrana (osmose reversa, ultrafiltração, nano filtração, entre outros).

A depender da tecnologia adotada, o LETA fica retido nas unidades de decantação ou flotação e/ou filtração. Em ETAs Convencionais, cerca de 60 a 95% do volume do lodo produzido ficam retidos nas unidades de decantação/flotação, sendo que a outra parcela é retida nas unidades de filtração dependentemente da natureza física e química da água bruta, da eficiência hidráulica das unidades de processo e do tipo e dosagem do coagulante aplicado (RICHTER, 2001). Uma pequena porção de lodo também é produzida na limpeza de unidades do sistema como câmaras de floculação, adsorção e desinfecção, contudo suas contribuições na produção de lodo da planta são pouco significativas (DI BERNARDO; DANTAS E VOLTAN, 2012).

Para Braga *et al* (2007), a lavagem dos filtros pode consumir de 2 a 10% do volume total de água produzida em uma ETA, confirmando os valores admitidos por Di Bernardo L. (2003) para as ETAs do tipo Dupla Filtração ao avaliar que a produção de lodo no processo de lavagem e descarga das unidades filtrantes chega a representar até 8% do volume afluente.

No que diz respeito à concentração dos sólidos no lodo, as descargas dos decantadores apresentam concentrações entre 0,1 a 4% ao passo que para a água de lavagem de filtros, estes valores se encontram entre 0,004 a 0,1% (RICHTER, 2001). Em termos de sólido, a maior parcela é gerada nas descargas dos decantadores ou na remoção de espuma, já em termos volumétricos, a maior quantidade de lodo se origina da lavagem dos filtros (HEDLUND, 2016; LUSTOSA *et al*, 2016; SILVEIRA, 2014).

Em ETAs de Dupla Filtração, os LETAs se originam na lavagem dos filtros ascendentes e descendentes, assim como nas descargas intermediárias realizadas nos filtros ascendentes (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012). Ainda, os volumes de lodo são obtidos em função do número de unidades filtrantes e da frequência de descargas e da lavagem dos filtros.

5.1.2 Análise Qualitativa do Lodo Gerado em ETA

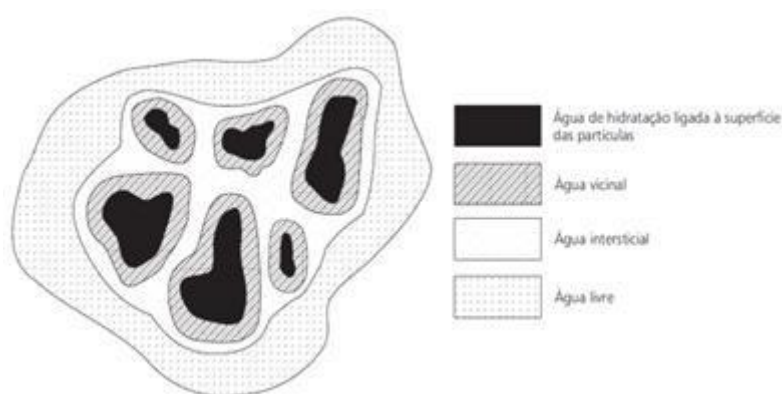
A caracterização do resíduo é primordial para avaliar seus impactos ambientais e para definição de projetos para o seu transporte, armazenamento em aterro, disposição e controle (SOUZA; SCALIZE, 2013). Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), classifica o lodo de ETA como resíduo classe II A – não inerte. Esse material é o resíduo gerado nos processos de tratamento de água, na qual é constituído de fase sólida e líquida, em que a maior parcela é formada por líquido.

Apesar de ser formado por maior parte de água, são as características da parte sólida que determinam o volume e a massa de resíduos gerados. Essa parte se forma devido ao emprego de compostos químicos utilizados, da natureza mineralógica dos sedimentos que se encontram na água bruta (areia, silte, argila, outros) e dos processos unitários (ARAÚJO *et al*, 2015; KATAYAMA, 2012).

A Figura 1 adiante mostra a presença de água no lodo antes do adensamento e do desaguamento.

- **Água Livre:** água dissociada de partículas sólidas;
- **Água Intersticial ou capilar:** água ligada mecanicamente, e se encontra presa nos flocos;
- **Água Vicinal:** múltiplas camadas de moléculas de água que se encontram ligadas à superfície da partícula através de pontes de hidrogênio;
- **Água de Hidratação:** água quimicamente ligada à superfície das partículas sólidas.

Figura 1: Esquema ilustrativo da distribuição da água no lodo



Fonte: Di Bernardo e Paz (2008)

A água livre é a fração de água mais fácil a ser retirada do lodo. De acordo com Jacomassi (2009), há colóides de tamanhos entre 1nm e 1 μ m na água a ser tratada, assim, os lodos têm dificuldade de remoção da água livre por meio do espessamento e desaguamento. As outras parcelas, em especial a intersticial e a vicinal, são retiradas através do uso de polímeros e métodos específicos (DI BERNARDO; PAZ, 2008).

5.1.3.1. Parâmetros Físicos

Conhecer os parâmetros físicos das partículas contribui nos estudos de redução de volume por meio da redução de água, quer pelos processos de desidratação quer por secagem. A caracterização física do lodo objetiva a definição de parâmetros como a concentração de sólidos, turbidez, cor, resistência específica, sedimentabilidade, tamanho e distribuição de partículas, densidade e viscosidade (SCALIZE, 2003).

De acordo com Grandin (1992) e McTigue *et al* (1990) apud Reali (1999) a resistência específica no lodo dos decantadores situa-se na faixa de 5 a 70.10^{12} mg/kg, enquanto que na água de lavagem de filtros está entre 0,1 a 15.10^2 mg/kg. Nas plantas em operação, o uso do condicionamento com polímeros sintéticos afeta de forma direta este parâmetro ao melhorar as condições de desidratação do mesmo.

5.1.2.2 Parâmetros Químicos

As características químicas do LETA são fatores determinantes na escolha do método de disposição final e nos estudos de reaproveitamento dos resíduos (CARVALHO, 2000). Nos LETAs elas são identificadas por meio de alguns parâmetros: concentração de metais pesados, pH, DBO, DQO, nitrogênio, fósforo, entre outros. Carvalho (2000) ainda diz que essas características dependem da qualidade da água bruta, dos produtos químicos, das reações no processo, da eficiência da ETA e do procedimento utilizado para limpeza das unidades. Parâmetros menos convencionais também podem existir nessa caracterização como concentração de fármacos, pesticidas, hidrocarbonetos (KATAYAMA, 2012).

A presença de metais de ferro e alumínio e outras substâncias podem influenciar na produção dos RETAs, no entanto, o pH e a dosagem de coagulante são os principais responsáveis pela produção e desidratação do lodo. Estima-se que a adição de agentes químicos para o tratamento pode representar até 92% dos sólidos contidos nos RETAs e a sua concentração varia consideravelmente de acordo com o fabricante (CARVALHO, 2000).

O LETA é composto principalmente por óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, argilas silicatadas, contaminantes e matéria orgânica. Os metais podem desenvolver efeitos tóxicos e gerar impactos nos processos de disposição e reutilização do lodo (PEREIRA S., 2011).

O tipo de coagulante usado no processo de tratamento define as características que o lodo irá produzir. Richter (2001) ressalta que LETAs à base de hidróxido de ferro ou de alumínio, possuem características semelhantes ainda que com diferentes composições. No resíduo, é possível identificá-los ligados à matéria orgânica, óxidos de ferro ou manganês. Estes resíduos possuem facilidade de sedimentação, porém resultam em grandes volumes e baixo teor de sólido pela baixa compressibilidade. Cordeiro (2002) ressalta que há domínio dos metais de forma sensível na fase sólida

do lodo e que quanto maior o intervalo de tempo de limpeza dos decantadores, a concentração de metal cresce.

Haja vista a diversificação das características do LETA, cabe verificar cada caso para se definir a magnitude e os tipos de impactos ambientais possíveis a partir da disposição desse resíduo (PAIVA *et al*, 2016). A Tabela 1 mostra os principais metais presentes nos lodos de ETA que utilizam Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico.

Tabela 1: Metais encontrados em lodo de ETAs que utilizam Alumínio e Ferro

Produto	Alumínio Faixa de Variação	Cloreto Férrico Faixa de Variação
Cádmio	1-2	< 0,1 – 2
Cobre	135 - 230	135 – 485
Cromo	40 – 64	62 – 513
Níquel	26 – 65	33 – 218
Chumbo	47 – 439	18 – 840
Zinco	195 - 815	215 - 865

Fonte: Adaptado de AWWA (1990, *apud* Andreoli *et al*, 2006)

5.1.2.3 Parâmetros Microbiológicos

Deve ser feita a caracterização biológica do LETA, pois o mesmo contém patógenos nocivos à saúde humana quando em contato direto com o homem. Todavia, quando são dispostos de forma correta, os poluidores patogênicos e produtos químicos apresentam baixos riscos ao meio ambiente e à saúde pública (ANDREOLI *et al*, 2006).

O tratamento da água bruta destina-se à proteção contra microrganismos e remoção de matéria orgânica. Quanto à matéria orgânica, os teores encontrados nos lodos de ETAs podem variar de 5 a 25% sendo em geral um pouco superior ao encontrado no solo (ANDREOLI *et al*, 2006). O autor ainda ressalta que o teor de matéria orgânica presente no lodo de ETA tende a ser maior do que no solo. A presença da matéria orgânica no LETA tem relação direta com as características dos mananciais que também determinam quais são as principais características da água

bruta e as características dos mananciais variam de acordo com questões socioeconômicas e ambientais.

O processo de secagem do lodo gerado em estações de tratamento de água reduz os riscos dos patógenos de veiculação hídrica. Pozzobon *et al* (2010) avaliaram a eficiência de técnicas de pré-tratamento e de desinfecção do lodo utilizando de condições ambientais próprias do local por meio de dois diferentes arranjos de leito de secagem: piso de concreto e suspenso em tela. Os resultados foram satisfatórios e mostraram a eficiência dos leitos ao eliminarem a maior parte dos microrganismos encontrados no lodo *in natura*.

Em estudos feitos por Silveira *et al* (2015) foi obtido valores de coliformes totais presentes no lodo gerado pelos decantadores das ETAs na faixa de $4,5 \times 10^5$ e $3,5 \times 10^5$ NMP/100 mL na unidade que utiliza respectivamente cloreto férrico e cloreto de polialumínio (PAC). Hedlund (2016) obteve valores próximos, sendo $4,48 \times 10^5$ NMP/100 mL nas amostras de uma ETA cujo coagulante utilizado também foi o PAC. Ele explica que os valores elevados podem ser explicados por não ter sido realizado pré-cloração na ETA antes do tratamento e também devido às características do manancial de captação.

5.2 ETAs de Dupla Filtração

Deve-se atentar para o número de ETAs não-convencionais e sua importância em termos de porcentagem da vazão em relação à vazão total tratada. No estado do Tocantins, 80% da vazão total tratada é realizada por meio dessas tecnologias (DI BERNARDO L., 2003). O autor ainda diz que somente em 1977 começaram a ser realizadas pesquisas sobre filtração direta ascendente no Brasil e que se estima ter no país mais de 350 unidades instaladas, construídas em concreto, chapas de aço ou fibra com capacidade de tratamento que se encontram entre 5 e 2.000 L/s.

As estações de tratamento do tipo Dupla Filtração tratam turbidez acima de 100. Nas etapas, primeiramente, a água coagulada passa pelo filtro ascendente, com granulometria adequada para que seja produzida água filtrada com turbidez abaixo de 10 uT (DI BERNARDO A., 2004).

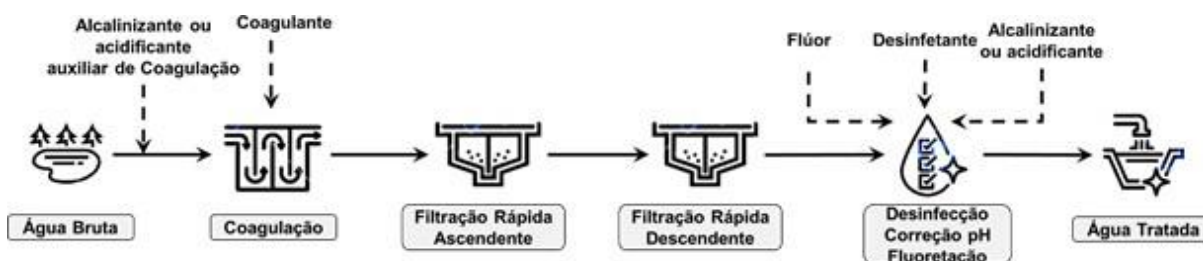
A tecnologia de Dupla Filtração apresenta algumas vantagens em relação à Filtração Direta, conforme ressalta Di Bernardo L. (2003): i) permite o tratamento de água com pior qualidade; ii) possibilita o uso de taxas de filtração mais elevadas; iii)

garante maior segurança operacional frente às variações da água bruta; iv) eleva a remoção global de microrganismos; e v) dispensa o descarte do efluente do filtro ascendente no início da carreira de filtração.

O processo de tratamento tem início na chegada da água bruta em uma câmara de carga onde o coagulante é introduzido. Posteriormente, a água coagulada é distribuída na parte inferior do Filtro Ascendente por meio de um sistema de drenagem (tubos perfurados, calhas invertidas, difusores, etc. passando pela camada de pedregulho e depois pela camada de areia grossa ou apenas pela de pedregulho. A seguir, a água pré-filtrada é coletada por meio de calhas instaladas no topo dos filtros e, em seguida, passa para o filtro descendente. Adiante, a água filtrada é conduzida à câmara de contato para receber os produtos químicos finais. No decorrer desse processo, são realizadas a limpeza e descarga de fundo das unidades filtrantes. Esta lavagem é realizada com a água filtrada final, proveniente de reservatório elevado ou semienterrado, e com bombeamento direto.

Um fluxograma esquemático do processo de Dupla Filtração é apresentado na Figura 2 a seguir. Contendo também as etapas onde ocorrem a geração dos LETAs.

Figura 2: Fluxograma do Tratamento por Dupla Filtração



Fonte: Adaptado de Di Bernardo A. (2004)

5.3 Tecnologias de Adensamento do Lodo

O adensamento ou espessamento é a primeira etapa do tratamento dos LETAs e têm importância no processo de tratamento, visto que nessa etapa ocorre a clarificação do lodo e, adiante, o adensamento do sedimento ou flotado. Assim, a principal função dessas unidades no processo é o aumento da concentração de sólidos do LETA. O adensamento proporciona o aumento da concentração de sólidos do lodo e diminui o volume de lodo potencializando os equipamentos de

desaguamento e provocando impacto na gestão dos resíduos do processo (REALI, 1999; HEDLUND, 2016; REALI *et al*, 2019).

Os equipamentos de desaguamento mecânico encontrados no mercado recomendam uma concentração de sólidos no resíduo de entrada acima de 2% (20g/L de SST) para um funcionamento ideal (FERREIRA FILHO, 1997; DI BERNARDO; PAZ, 2008). Silva (2019) realça que é imprescindível o uso de polímeros no pré-condicionamento do lodo em dosagens que geralmente variam de 0,5 a 6,0 gramas de polímero por quilo de sólidos secos (g/kg) independente do sistema de adensamento adotado.

Sendo a remoção da maior parcela de água do lodo na etapa de adensamento, a sua disposição final dependerá do seu teor de umidade. Nesse contexto, para obter um adensamento do lodo eficiente, ambas tecnologias usam das características intrínsecas ao sólido, como sua velocidade de sedimentação ou a sua capacidade de adesão à superfície para otimizar a separação sólido-líquido.

5.3.1 Adensamento por Gravidade ou Sedimentação

No Brasil, o adensamento por gravidade ou sedimentação é a metodologia mais usada consistindo na separação entre as fases líquida e sólida por meio da velocidade de sedimentação dos sólidos. A sedimentação é o fenômeno físico em que as partículas suspensas são sedimentadas por ação da gravidade devido à sua massa (LOVO, 2016).

O adensamento por gravidade pode ser realizado de forma contínua ou em batelada em tanque circular. Quando realizado de forma contínua, a saída do clarificado e a entrada do lodo na unidade acontecem de maneira ininterrupta; já quando é efetuado por batelada, o lodo removido é retirado após algumas horas de adensamento (CHAVES, 2012; HEDLUND, 2016). Ainda, é recomendado para ambos os modelos um mecanismo de raspagem de fundo para remoção do lodo sedimentado.

Segundo Nunes e Além Sobrinho (2002) a sedimentação nos decantadores ocorre por zona ou por compressão. A sedimentação por zona ocorre no encontro das partículas que, quando se aproximam, sedimentam como uma massa de partículas e apresentam uma interface característica entre o lodo e o clarificado. A partir de então, é iniciada a sedimentação por compressão que acontece quando as partículas se

acumulam no fundo do tanque, comprimindo as demais com o seu peso (VON SPERLING, 2011).

De acordo com Chaves (2012), para o adensamento por gravidade, os lodos oriundos do tratamento de água bruta com alta turbidez são mais fáceis de adensar e é importante que o processo de tratamento da água da lavagem dos filtros seja flexível a alterações bruscas na qualidade da água. Hedlund (2016) destaca que alguns fatores influenciam na sedimentação: o tamanho do floco, a densidade, a velocidade, a viscosidade e o efeito parede durante a decantação.

Bourgeois, Walsh e Gagnon (2004) cita que para a sedimentação, maiores dosagens de alumínio conseguiram remover as cargas orgânicas totais e dissolvidas do compósito. Para os autores, as cargas orgânicas totais e dissolvidas do compósito chegaram a maior remoção quando se tem maiores dosagens de alumínio.

Mattos e Girard (2013) fizeram ensaios de adensamento em coluna com o uso de polímeros a fim de avaliar se o adensamento é uma técnica viável para tratar o lodo para a disposição final. Mesmo que os resultados obtidos indicaram a inviabilidade da técnica para os processos de desaguamento, os autores destacaram que o uso de polímeros sintéticos melhora a qualidade do processo, destacando o aumento na velocidade de sedimentação em zona cuja performance sem polímero se mostrou aproximadamente inferior em 50% do que a velocidade das amostras com polímero. Melhora esta que também foi alcançada em pesquisas feitas por Hedlund (2016).

Lovo (2016) preparou uma amostra de água a ser submetida a ensaios de tratabilidade, lodos com diferentes concentrações de Sólidos Suspensos Totais (SST). Os resultados mostraram melhor eficácia dos polímeros sintéticos em relação aos polímeros orgânicos no adensamento por sedimentação. Ainda, confirma que quanto maior a concentração de SST no lodo inicial, menores serão os valores para turbidez e sólidos totais da água clarificada e que quanto maiores as velocidades de clarificação, maior será o adensamento dos SST.

Portanto, verifica-se que o condicionamento é importante na melhoria dos resultados referentes ao adensamento. Assim, é evidenciado a importância da seleção do polímero e dos coagulantes com dosagens ideais, além das características da água bruta (GUIMARÃES, 2007).

5.4 Polímeros

Polímeros são moléculas orgânicas e hidrossolúveis de cadeia molecular longa. É um dos principais coagulantes utilizados nas unidades de tratamento de água, assim como os sais metálicos e a cal. Destacam-se devido a sua eficácia no auxílio da coagulação, floculação e filtração (DI BERNARDO; PAZ, 2008).

Sua principal função no processo de tratamento é aumentar o tamanho das partículas do lodo, seja pela neutralização-adsorção das cargas e formação de pontes ou pela combinação dos dois mecanismos (LOVO, 2016).

Diversas são a origem desses compostos, podendo ser de origem natural (amido) ou sintética; e classificados pela densidade de carga elétrica (alta, média, baixa) e também pelo seu peso molecular (baixo, médio, alto, muito alto). A carga do polímero é apropriada para neutralizar as cargas da matéria em suspensão na água. E por fim, dependendo da carga superficial predominante em meio aquoso podem ser classificados em aniônicos, catiônicos e não iônicos.

Corriqueiramente, os polímeros são preparados por meio da co-polimerização de acrilamida com um monômero catiônico ou aniônico ideal e resulta em polímeros de diferentes cargas. A Figura 3 mostra a representação esquemática da constituição da cadeia polimérica para entendimento da conformação destas moléculas através de suas cargas e composição.

Figura 3: Representação esquemática dos Polímeros Aniônicos, Não Iônicos e Catiônicos



Fonte: Adaptado de Haak (2011)

Além da carga do polímero, a combinação de outros fatores determina a eficiência do emprego destes no condicionamento ótimo do lodo, entre eles: dosagem, o tempo de mistura e o gradiente de velocidades (HAAK, 2011). Geralmente, quando

é usado polímeros de alto peso molecular e carga, tem-se melhores resultados de desidratação (HAAK, 2011; LIMA, 2016).

Ferreira Filho (1997) reparou que apesar das características intrínsecas do lodo a ser adensado possam fazer com que o polímero se comporte de forma diferente, aumentar as dosagens de polímeros melhora a sedimentação para quaisquer um dos tipos avaliados. O autor estudou as características do pré-condicionamento dos lodos no adensamento por gravidade avaliando, dentre os parâmetros, o tipo e dosagem de polímeros.

O emprego de polímeros nos LETAs produz melhoria dos processos de desaguamento. Destaca-se ainda que tal melhoria além de ser verificada por Ferreira Filho (1997) é também vista em outros estudos (CHAVES, 2012; MATTOS; GIRARD, 2013; SILVEIRA, 2014; LOVO, 2016; HEDLUND, 2016). Di Bernardo A. *et al* (2000) citam vantagens desta aplicação na fase de coagulação: melhoria da qualidade das águas decantadas e filtradas; redução do consumo de coagulantes; redução de OPEX; aumento da eficiência de desinfecção, como consequência da redução do SST na água filtrada.

Segundo Gonçalves *et al* (2001), caso os polímeros sintéticos sejam comparados aos demais condicionadores orgânicos, apresentaram vantagens, entre elas: redução da massa de lodo produzida; melhoria das rotinas de operação e redução das manutenções na planta. Os polímeros apresentam alto custo e o volume dosado é baixo, no entanto, o seu uso garante um aumento significativo na eficiência de remoção de sólidos do lodo (BOURGEOIS *et al*, 2004).

Silva Júnior e Isaac (2002), avaliaram as dosagens e os tipos de polímeros no adensamento por gravidade de duas ETAs, uma com decantador do tipo convencional e outra com decantador de alta taxa. Pelos parâmetros de turbidez, sólidos e fatores de espessamento e clarificação para a escolha de qual seria o melhor polímero, o adensamento mostrou mais eficácia com o polímero aniônico, de alto peso molecular e pouca densidade de carga para os dois tipos de decantadores.

Ao submeter amostras de água em ensaios de tratabilidade para obtenção de LETA mostra que os polímeros sintéticos são mais eficientes que os polímeros naturais no adensamento por gravidade (Ismail *et al*, 2019). E que quanto mais elevada for a concentração de SST no resíduo, menores serão os valores de turbidez e sólidos totais da água clarificada, bem como maiores velocidades de clarificação e

adensamento. Também, quando é aumentado a dosagem do polímero, menor é a quantidade de sólidos totais no sobrenadante do LETA.

5.4.1 Polímeros Catiônicos

Segundo Sartori (1998), os polímeros catiônicos contêm grupos carregados positivamente, como amino ($-\text{NH}_3^+$), imino (CH_3^- , NH_2^+ , CH_2^-) ou o amino quaternário ($^+\text{NR}_4$). Esses polímeros podem ser empregados como coagulantes primários, ou seja, neutralizam ou desestabilizam partículas coloidais, além de funcionar como auxiliar de floculação (KEMMER, 1987). Landim (2005) complementa que, os polímeros catiônicos podem ser utilizados sem utilização prévia de coagulante, diferentemente dos polímeros aniônicos ou não-iônicos, em virtude de possuírem cargas positivas que podem baixar o potencial zeta e promover a floculação.

A redução do potencial decorre da entrada dos cátions na superfície eletrocinética da partícula. Como consequência, as forças de repulsão entre as partículas são quase zero e elas são aglutinadas pelas forças de Van der Waals. Tais efeitos são acelerados na presença de íons metálicos, o que torna a aplicação dos polímeros com melhores resultados (HOSOKAWA *et al*, 1999).

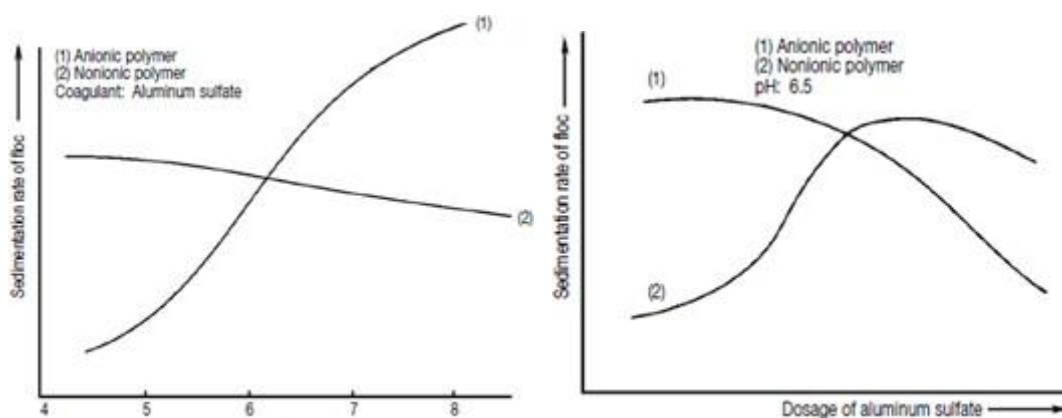
Di Bernardo A. *et al* (2000) apontam que uma possibilidade de preparação dos polímeros catiônicos é a co-polimerização de acrilamida com um monômero catiônico apropriado, resultando em polímeros catiônicos de massa molecular relativamente alta. No entanto, a dosagem não deve ser maior que 0,5 mg/L devido ao problema de toxicidade, pois pode aparecer traços de meros na água tratada, principalmente acrilamida.

5.4.2 Polímeros Aniônicos

Os polímeros aniônicos, geralmente, são usados como floculante para tratamento de água, quando de alto peso molecular; ou dispersantes, quando de baixo peso molecular. Os grupos que formam sua estrutura são formados em menor parte por carboxílicos ($-\text{COOH}$) e em maior parte por amidas ($-\text{CONH}_2$) (HOSOKAWA *et al*, 1999). Na floculação, também funcionam como auxiliares; e para a dispersão, é ocorrida por meio da adsorção dos SST ocorrida na superfície com repulsão das moléculas a partir da transferência de cargas negativas para os sólidos existentes no meio aquoso (KEMMER, 1987).

De acordo com a Figura 4 a seguir, a densidade da carga dos polímeros aniônicos e não iônicos variam conforme o pH e a dosagem de coagulantes no meio aquoso. Em meio aquoso de pH básico ou com baixa concentração de coagulantes, os polímeros aniônicos possuem melhor desempenho. Em soluções de condições alcalinas, ocorre a dissociação dos grupos carboxílicos e expansão do volume dos polímeros.

Figura 4: Relação entre pH e dosagem de coagulantes entre os Polímeros Aniônicos e Não-Iônicos



Fonte: Hosokawa *et al* (1999)

Nos gráficos mostrados na Figura 4 observa-se melhor eficiência dos polímeros não-iônicos em soluções de pH ácido ou em altas dosagens de coagulantes que mostra melhor desempenho se comparado ao aniônico. Nos polímeros aniônicos, altas dosagens favorecem as reações entre os íons metálicos e reduz a eficiência da remoção dos SST (HOSOKAWA, 1999).

5.5.3 Polímeros Não Iônicos

São definidos como polímeros sem carga iônica. Na remoção dos sólidos nesses polímeros, os pequenos flocos se juntam ao polímero para formar flocos grandes por vias de ligações de hidrogênio (LANDIM, 2005).

De forma geral, os polímeros não iônicos não sofrem influência significativa pela variação do pH na solução aquosa. Já os polímeros catiônicos apresentam melhor eficiência em meios ácidos e os aniônicos em meios básicos (KEMMER, 1987). Também declara que há eficiência nos polímeros não iônicos com alto peso molecular em alguns sistemas.

5.5 Legislação e Aspectos ambientais

Nas ETAs, os principais impactos ambientais gerados são provenientes dos resíduos do processo. Por muito tempo, a água de lavagem dos filtros e as descargas de decantadores eram lançadas em corpos d'água sem tratamento prévio (CORDEIRO, 1999; GUIMARÃES, 2007). Para Katayama (2012), uma parcela do lodo produzido nas estações de tratamento de água (ETAs) no Brasil é disposto inapropriadamente em rios ou em aterros sanitários.

Somente no final da década de 1990, com a instituição da Lei Nº 9.433/97 – “Política Nacional de Recursos Hídricos”, da Lei Nº 9.605/98 - “Crimes Ambientais” e, posteriormente, com a implantação da Resolução CONAMA Nº 357 (2005) e CONAMA Nº 430 (2011) que estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes em corpo receptor que a preocupação com esses rejeitos ganhou destaque. Com isso, as responsabilidades dos gestores do saneamento cresceram, pois passaram a responder criminalmente pelo lançamento inadequado desses resíduos. Assim, exigiram nova conduta dos órgãos fiscalizadores e dos responsáveis pelos sistemas de tratamento (LUSTOSA *et al*, 2016).

A lei de Crimes Ambientais (Lei Nº 9.605/98), em seu capítulo V, Seção III, Art. 54, classifica crime contra o Meio Ambiente como “causar poluição de qualquer natureza que resultem ou possam resultar danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora”. Nesta seção, são enquadrados como danos quaisquer “lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, ou detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos” (BRASIL, 1998).

Os resíduos sólidos estão definidos na NBR 10.004 constando os rejeitos do tratamento de água. Os LETAs podem ser classificados como “Resíduos Classe II – Não Perigosos” contemplando o subgrupo “Classe II A – Não inertes”, pois não apresentam características de inflamabilidade, reatividade, toxicidade e patogenicidade presentes na Classe I. Ainda que no lodo haja patogenicidade, os resíduos gerados em ETA seguem o mesmo critério de exceção dos resíduos de ETE descrito na norma em que não são classificados segundo os critérios de patogenicidade. A classificação do subgrupo Classe II A – Não inertes é devido às concentrações elevadas de metais como alumínio e ferro presente nos coagulantes aplicados no tratamento de água.

Portanto, deve-se haver o gerenciamento adequado dos resíduos de ETAs, pois passa a ser um aspecto imprescindível do planejamento das companhias de saneamento (GUIMARÃES, 2007). Essa tendência de soluções para uma melhor gestão do LETA abrange ainda a adoção de uma forma ambientalmente correta e sustentável do ponto de vista financeiro.

6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

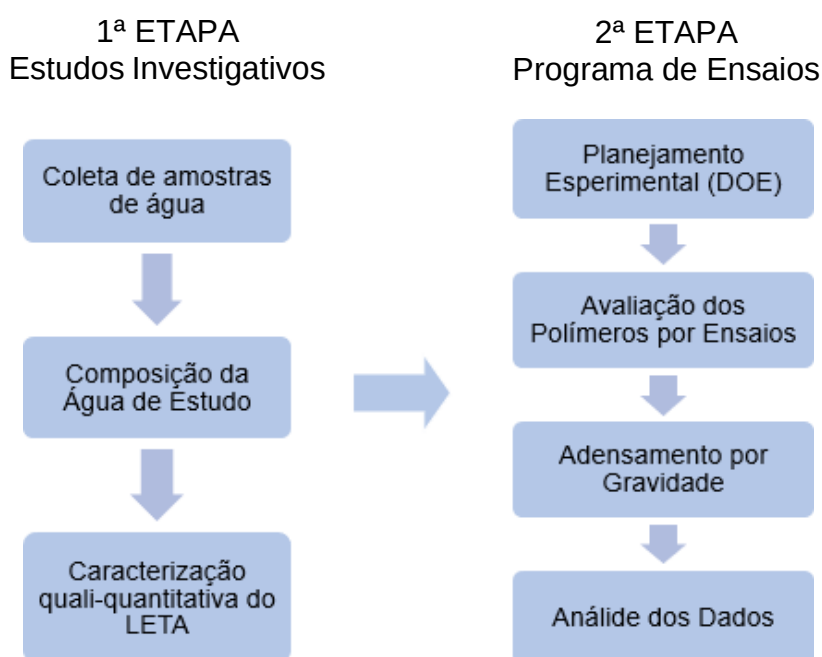
A metodologia proposta foi dividida em duas fases: (i) A primeira correspondente aos **Estudos Investigativos** e (ii) a segunda, ao **Programa de Ensaio**.

Os **Estudos Investigativos** compreenderam buscas na literatura para entender os princípios de formação do lodo, na identificação das tecnologias de adensamento a serem utilizadas e na caracterização do LETA. Conseguir relacionar as condições operacionais de uma ETA com o desempenho dos processos de adensamento ajuda a perceber a relação das características no processo de adensamento e parâmetros da sedimentação foi essencial para a interpretação dos resultados.

A fase de **Programa de Ensaio** compreendeu a respeito da rotina de laboratório para determinar as dosagens adequadas do processo de condicionamento dos LETAs de Dupla Filtração. Além do mais, foram avaliados os principais parâmetros de eficiência nos processos de adensamento por sedimentação.

O fluxograma a seguir da Figura 5 resume o desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 5: Fluxograma de Pesquisa Proposta



Fonte: Próprio Autor (2021)

6.1 Caracterização da Área de Estudo

O LETA usado nessa pesquisa é oriundo de uma Estação de Tratamento de Água modelo do tipo Dupla Filtração devido às características da água do manancial. Assim, é composta de um Filtro Ascendente com Pedregulho (FAP) seguido de um Filtro Rápido Descendente (FRD).

A primeira etapa compreende o processo de aplicação do coagulante realizado diretamente na tubulação à montante da câmara de carga. Em seguida, a água coagulada é encaminhada a um FAP de seção circular. Então, a água pré-filtrada é coletada por um conjunto de calhas laterais, além de uma calha central e conduzida até um FRD circular que tem um meio filtrante composto de areia. Adiante, após as etapas de fluoretação e desinfecção, a água tratada é direcionada para o reservatório.

Os LETAs da unidade (fase sólida do processo) são oriundos das operações de lavagem de água do FAP, do FRD e das descargas de fundo do FAP.

6.2 Equipamentos e Métodos Analíticos

Os ensaios seguem a método descrito no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* em sua 23ª edição (APHA, 2017), sendo a maioria feitos no laboratório de química do IFTO Campus Palmas – TO e as caracterizações realizadas no Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP, em Ribeirão Preto – SP.

O Quadro 1 a seguir os equipamentos usados.

Quadro 1: Equipamentos de Ensaio

Equipamentos	Parâmetro de Interesse
Balança Eletrônica	Pesagem de Amostras e Produtos Químicos Sólidos (Totais, Voláteis)
Coluna de Sedimentação	Adensamento por Gravidade
pHmetro	Medição de pH
Turbidímetro Nefelométrico	Medição de Turbidez
Cone Imhoff	Sólidos Sedimentáveis
Cronômetro	Medição de Tempo

Fonte: Próprio Autor (2021)

6.2.1 Caracterização da Água de Estudo

Para fazer os ensaios de adensamento, foi usada amostra coletada da mistura das Águas de Lavagem do FAP, de Lavagem do FRD e das Descargas de Fundo Intermediárias dos filtros, sendo considerados os volumes proporcionais presentes no LETA produzido. Para definir as características do resíduo produzido em cada uma das unidades, amostras foram coletadas e armazenadas de forma separada e foi feita a caracterização físico-química individualmente (série de sólidos, turbidez, pH, alcalinidade, tamanho de partícula, etc).

A coleta individual foi realizada para evitar a contaminação da Água de Estudo com outro resíduo presente na Lagoa de Sedimentação existente. Por último, as amostras foram unidas para formar um material único, na qual foi chamado de “Água de Estudo”.

Para ter uma amostra representativa, os volumes foram determinados segundo a duração da carreira de filtração, as quantidades descartadas durante as operações de lavagem dos filtros, a frequência das descargas de fundo e a qualidade da água pré-filtrada e filtrada. Conforme esses parâmetros definiu-se os volumes proporcionais que formaram a “Água de Estudo”.

Atentando que um LETA depende de alguns fatores, e entre eles estão: a qualidade da Água Bruta e dos processos de tratamento, sendo que esses fatores possuem relação direta com o desempenho dos sistemas de adensamento, também é preciso fazer a análise das características físico-químicas da água bruta e do lodo gerado no processo de tratamento. Ainda, foram avaliados os parâmetros das amostras dos resíduos gerados pelo FAP, FRD e DFI.

A Tabela 2 a seguir aponta os parâmetros físico-químicos avaliados em cada uma das amostras coletadas, os métodos de medição utilizados e os limites de detecção conforme APHA (2017).

Tabela 2: Parâmetros, Métodos e Limites de Detecção segundo APHA (2017)

Parâmetro	Unidade	Método	Limite de Detecção
Alumínio	mg/L Al	Espectrofotometria	0,01
Alcalinidade	mg CaCO ₃ /L	Titrimétrico	1
Carbono Orgânico Total	mg C/L	Combustão Infra Vermelho	0,5
Carbono Orgânico Dissolvido	mg C/L	Combustão Infra Vermelho	0,5
Ferro	mg Fe/L	EAA – Chama	0,01
Mangânes	mg Mn/L	EAA – Chama	0,01
pH	Adimensional	Potenciométrico	0,01
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Turbidez	uT (NTU)	Neftelométrico	0,01

Fonte: Adaptado de Silva (2019)

6.2.2 Coleta das Amostras

O LETA foi coletado de acordo com a duração da carreira de filtração mais longa da unidade (FAP), com aproximadamente 72h de duração. No decurso desse procedimento foram feitas aferições da turbidez para verificar as variações entre o início e o fim das lavagens e das descargas de fundo.

Na campanha de coleta foi considerada a duração das operações em escala real, em que as lavagens e descargas variam de 3 a 5 minutos. Os volumes coletados foram divididos em baldes graduados coletando 340 L de LETA e a campanha foi feita de acordo com que mostra a Tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Procedimento de Coleta de Amostras

Processo	Duração de Carreira (h)	Volume de Operação (m ³)	Volume de Amostra (L)	Tempo de Coleta (min)	Baldes Coletados (un)
Descarga de Fundo (DFI)	24	43,3	120	3'00"	6
Lavagem do FAP	72	58,5	160	4'00"	8
Lavagem do FRD	24	58,5	60	4'30"	3

Fonte: Próprio Autor (2021)

Feito a coleta, foi realizado amostras de cada unidade parar fazer análise físico-química do resíduo e continuou com o preparo da Água de Estudo.

Figura 6: Coleta das Amostras

Fonte: Próprio Autor (2021)

6.3 Polímeros

A pesquisa avaliou polímeros com cargas diferentes: cargas catiônicas, aniônicas e não-iônicas para averiguar a eficácia desses polímeros na separação das fases líquida e sólida pela formação do floco do lodo. Os polímeros utilizados são da empresa Hidrodomi®. No Quadro 2 a seguir é apresentado as principais características de cada tipo de polímero sintético.

Quadro 2: Características dos Polímeros

Tipo de Polímero	Tipo Iônico	Forma	Densidade de Carga	Peso Molecular
CLIM FLOC A8933	Aniônica	Cristais	Média	Alto
CLIM FLOC C7852	Catiônica	Cristais	Alta	Alto
CLIM FLOC N3102	Não – Iônica	Cristais	-	Alto

Fonte: Próprio Autor (2021)

As soluções de polímero foram elaboradas na concentração de 0,1%. A preparação da solução se deu com um alto Gradiente de Mistura com a finalidade de quebra da cadeia polimérica e melhoria da eficiência do polímero em solução. O Tempo de Mistura da solução foi fixado em 1 hora, pois as cadeias de polímeros devem serem abertas sem serem para se ter uma melhor diluição do produto em água destilada.

6.4 Programa de Ensaios

Os procedimentos experimentais dos ensaios foram feitos de acordo com o estabelecido no “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*” (APHA, 2017) e comportou a fase inicial das análises e caracterizações das amostras até a avaliação dos métodos de adensamento.

6.4.1 Planejamento de Experimentos - DOE

O Planejamento de Experimentos (DOE - *Design of Experiments*) tem o propósito de redução do número de ensaios e validar estatisticamente ensaios efetuados para satisfazer a dois principais objetivos: maior precisão estatística

possível na resposta e menor custo. Os métodos de adensamento desse trabalho foram ponderados pela Metodologia de Superfície de Resposta (*RSM - Response Surface Methodoly*). O RSM é utilizado em processo iterativo para haver melhora da qualidade do parâmetro, reduzindo a variabilidade e aperfeiçoando o produto e seu desempenho no processo (MEYERS *et al*, 2016).

A análise do RSM teve auxílio do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) 2^2 com 3 pontos centrais. O DCCR é o delineamento mais empregado para se ajustar um modelo de segunda ordem em uma superfície composta (MONTGOMERY, 2013). Essa metodologia tem por finalidade fornecer a estimativa do erro experimental, ter sensibilidade à presença de *outliers*, descrever da melhor maneira a superfície de resposta em estudo e dar estabilidade de distribuição da variância na região de interesse, o que proporciona validação dos resultados provenientes de testes estatísticos. O *Protimiza Experimental Design* foi o software estatístico empregado para avaliação da significância e obtenção dos pontos pelo DCCR. O delineamento foi feito com duas variáveis independentes para cada um dos ensaios propostos.

O DOE avaliou a relação das variáveis qualitativas e quantitativas na eficiência do adensamento do LETA para cada metodologia proposta. O Quadro 3 abaixo mostra as variáveis avaliadas:

Quadro 3: DCCR – Entrada de variáveis Qualitativas e Quantitativas

Tecnologia de Adensamento	Qualitativa	Quantitativa (X1)
Adensamento por Gravidade	Carga Iônica	Dosagem de Polímero (mg pol/g SST)

Fonte: Próprio Autor (2021)

Devido às variáveis qualitativas apresentarem três tipos de polímeros, foi executada uma superfície de resposta para cada um. Para as variáveis quantitativas, a variável X_1 compreende as faixas de dosagem dos polímeros usados em unidades que fazem o uso dos sais de alumínio, na qual foi usado os limites mínimo e máximo situados entre 1,0 e 8,0 mg pol/g SST, observando os pontos indicados pelo DOE. Enfatiza-se que os valores compreendem dosagens avaliadas nos trabalhos de

Silveira (2014), Hendlund (2016) e Queiroz (2019) além das faixas classificadas por Texeira e Ferreira Filho (2015).

Dado a variável independente (X_1), foram estabelecidas as variáveis dependentes (Y_1, Y_2, Y_3) que é aquela na qual o valor depende de como a variável independente é modificada. Para os ensaios de adensamento, as variáveis de resposta procuradas foram a Velocidade de Sedimentação (V_{ad}), Velocidade de Clarificação (V_{cl}) e a Turbidez Remanescente da Água Clarificada (T_c).

As Tabelas 4 e 5 a seguir, apresentam os pontos de dosagem avaliados e o planejamento dos ensaios realizados com base no DOE.

Tabela 4: Variáveis de análise para o Adensamento por Gravidade

Nome da Variável	Código	Nível				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Dosagem de Polímero (mg pol/g SST)	X_1	0,34	1,00	4,50	8,00	8,66

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 5: Planejamento Experimental - Adensamento por Gravidade

Ensaio	Variável X_1
	Dosagem de Polímero (mg pol/g SST)
1	1 (-1)
2	8 (+1)
3	0,34 ($-\alpha$)
4	8,66 ($+\alpha$)
5	4,5 (0)
6	4,5 (0)
7	4,5 (0)

Fonte: Próprio Autor (2021)

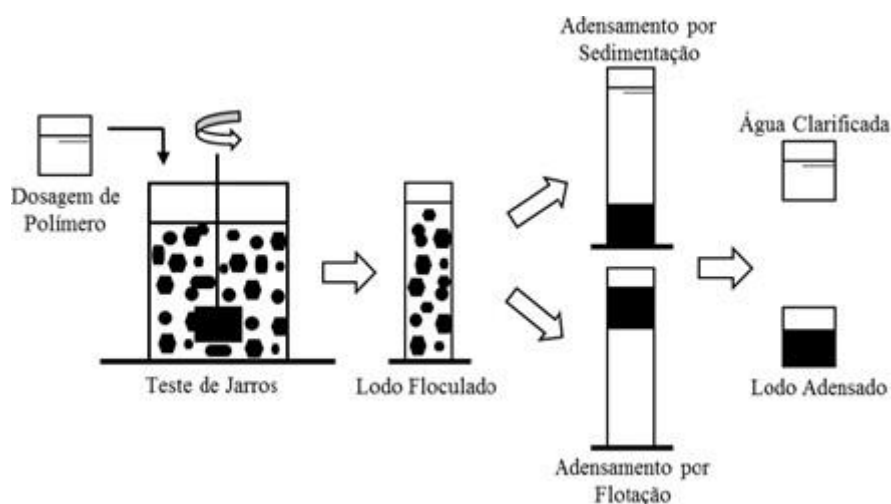
6.4.2 Ensaio de Adensamento

Os ensaios de adensamento foram feitos usando polímeros nas concentrações selecionadas pelo DOE. O condicionamento com polímeros se dá porque o mesmo funciona como auxiliar no condicionamento para obter parâmetros mínimos necessários para empregar tecnologias de secagem de LETAs.

Realizou-se ensaios de bancada usando o equipamento *Jar Test* com transferência para uma proveta graduada. O LETA foi floculado a partir dos parâmetros fixados do Tempo de Mistura Rápida (60s) e Gradiente de Mistura Rápida (300s^{-1}). Terminada a mistura para floculação do LETA, a solução adquirida era transferida para uma proveta graduada para ser realizado os ensaios de adensamento.

A Figura 7 mostra esquematicamente a realização dos métodos de adensamento por flotação e sedimentação segundo proposto por Zhao (2004 *apud* HEDLUND, 2016). Ressalta-se que somente o adensamento por sedimentação é o objeto de estudo no presente trabalho.

Figura 7: Esquemático dos Ensaio de Adensamento e FAD



Fonte: Hedlund (2016)

6.4.2.1 Adensamento por Gravidade

Foram feitos ensaios para identificar as curvas de sedimentação impedida (Sedimentação Tipo III), como proposto no Método de Talmadge e Fitch (1955). Pelas curvas, obtém-se as Velocidades de Adensamento e Clarificação a partir dos pontos

obtidos pelos gráficos gerados que indicam a Altura da Interface Lodo/Água *versus* Tempo.

Os ensaios foram realizados em proveta graduada de 1 litro com duração de até 30 minutos ou até a estabilização do adensamento. Este tempo foi considerado suficiente para examinar o comportamento do floco para realização de gráficos representativos de cada ponto analisado. Nesse tempo, efetuou leituras da interface para determinar a curva de adensamento e conseguir as velocidades de sedimentação/clarificação.

Os ensaios seguiram a ordem a seguir:

1. Agitar a amostra composta para homogeneizar a mistura e preencher os jarros do equipamento (*jar test*), sendo usado 2 litros para cada ponto de análise;
2. As dosagens dos polímeros em emulsão foram adicionadas em emulsão em cada jarro segundo proposto no DOE apresentado na Tabela 5;
3. Execução da mistura rápida da solução no jarro, com Tempo de Mistura Rápida de 60 s e o Gradiente de Mistura Rápida em 300 s-1;
4. Depois de misturado, o volume do *jar test* da Solução I foi transferido imediatamente para um Cone *Inhoof* para verificação dos sólidos e leituras de turbidez do sobrenadante (NTU). As leituras foram feitas a cada 5min durante 1h;
5. Feito a mistura, o volume da Solução II era transferido imediatamente para uma proveta graduada em que era iniciado as leituras da interface lodo/água durante um período total de 30 min;

A Concentração de Sólidos Totais no lodo adensado é encontrada pelas fórmulas (1) e (2), também avaliado por Silveira (2014).

$$SST_{Lodo} = \frac{(SST_{ap} - SST_{sobren})}{V_{Lodo}} \quad (1)$$

$$TS_{Sólidos}_{Lodo} = \frac{SST_{Lodo}}{10.000} \quad (2)$$

Terminado os ensaios de adensamento por gravidade, são determinadas as velocidades de sedimentação/clarificação a partir da interpretação das Curvas de Adensamento alcançadas pelo gráfico altura da interface lodo/água *versus* tempo. As etapas do ensaio são notadas na Figura 8 abaixo.

Figura 8: Etapas dos Ensaio de Adensamento por Gravidade



(a) Adição de Polímeros no LETA; (b) Medição de turbidez – Solução I;
(c) Ensaio de Adensamento por Gravidade – Solução II.

Fonte: Próprio autor (2021)

6.4.3 Análise de dados

Para testar a correlação entre as variáveis para definir a melhor solução, foi usado a Análise de Variância ou ANOVA e Tukey para completar as comparações múltiplas. Com a análise de dados é possível verificar se os parâmetros qualitativos influenciarão no modelo. Para análise de significância do modelo, foi admitido um nível de 10%.

Dessa maneira, o uso dos métodos busca avaliar quais as influências qualitativas e quantitativas dos parâmetros de desempenho no processo de adensamento do lodo de ETA. Será usado o software *Statística 10* para realização dos testes de ANOVA e Tukey.

O tratamento estatístico dos ensaios seguiu com as etapas a seguir:

1. Obtenção do grau de significância (p-valor) para cada variável da pesquisa após o tratamento no software Protimiza Experimental Design;
2. Elaboração do modelo matemático com os coeficientes das variáveis sobre as respostas no momento em que fica confirmado a existência de significância para alguma variável;
3. Realização de Análise de Variância (ANOVA) para cada modelo com a finalidade de verificar se os valores previstos eram apropriados aos valores experimentais;
4. Elaboração de Gráficos de Superfície de Resposta para cada índice de desempenho após validação do modelo matemático pela ANOVA.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De início, são mostrados os dados da caracterização da Água de Estudo. A seguir, é apresentado os resultados alcançados para a Turbidez do Sobrenadante e Velocidades de Clarificação e Sedimentação baseado nos Ensaio de Adensamento para os três tipos de polímeros avaliados. Por último, é feita a análise comparativa entre os dois métodos utilizados com um pré-dimensionamento das unidades de acordo com os melhores parâmetros obtidos.

Nessa discussão dos resultados obtidos, apenas serão apresentados os modelos matemáticos e gráficos daqueles resultados que comprovem a significância estatística, assim como a síntese das equações e análises. Já os modelos e as equações matemáticas dos outros ensaios e os gráficos das curvas de adensamento que não alcançaram significância estatística, encontram-se nos Apêndices, ao final deste trabalho.

7.1 Água de Estudo

Na Tabela 6 a seguir, são mostrados os resultados da caracterização físico-química do LETA da Água de Estudo.

Tabela 6: Caracterização físico-química da Água de Estudo

Parâmetro	Unidade	Água Bruta	LETA			
			FAP	FRD	DFU	Amostra Composta
Alumínio	mg/L Al	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Alcalinidade	mg CaCO ₃ /L	57	55	59	56	55
Carbono Orgânico Total	mg C/L	2,178	34,03	1,987	7,796	5,389
Carbono Orgânico Dissolvido	mg C/L	1,552	2,460	1,753	6,062	2,164
Ferro	mg Fe/L	<0,01	7,42	0,59	18,45	6,28
Manganês	mg Mn/L	<0,01	<0,01	<0,01	0,09	<0,01
pH	Adimensional	7,45	7,22	7,66	7,02	7,30
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	2	148	11	495	160
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	85	-	-	-	-
Sólidos Totais	mg/L	87	241	105	593	247
Turbidez	uT (NTU)	0.90	89.7	60.7	262	95.1

Fonte: Próprio autor (2021)

Percebe-se que as águas usadas para formar a água de estudo têm valores de Turbidez e Sólidos Totais baixos, em que há exceção para a Descarga de Fundo do FAP, visto com 262 NTU. Valores esses que se esperava, pois a DFU realiza descargas pontuais durante a operação da planta e ainda dispõe de uma carreira mais longa. Ainda, a origem desse resíduo é de uma região que retém parcela considerável dos sólidos do tratamento e que é irrealizável o arraste total dos sedimentos na etapa de lavagem dos filtros.

Todavia, a qualidade da Água Bruta captada é boa, pois apresenta baixos valores de Sólidos (87 mg/L) e de Turbidez (0,90 NTU), por isso, a metodologia utilizada no tratamento é a do tipo Dupla Filtração. Também se esperava que a porção dos Sólidos Suspensos seria maior do que a dos Sólidos Dissolvidos, pois a maior parcela dos sólidos presentes no LETA é devida aos Sólidos em Suspensão.

O aparecimento dos metais Alumínio e Manganês foram mínimas. No entanto, a concentração de Ferro no FAP (7,42 mg/L) e na DFU (18,45 mg/L) aponta que na ETA é usado agentes coagulantes com metais ferrosos. Essas concentrações eram esperadas, pois compõem a etapa inicial do processo de tratamento responsável por reter sólidos maiores. Ainda, percebe-se a eficiência da remoção desse metal na unidade, visto que o valor no FRD é baixo (0,59 mg/L).

Para Matéria Orgânica na DFU (7,796 mg/L) tem valores maiores do que as outras unidades, o que mostra a retenção de matéria orgânica na etapa. Ainda, devido às etapas de coagulação e floculação também apresentarem redução desse teor implica dizer que nessa unidade apresenta valores altos em relação às demais e evidencia a eficiência dos processos na remoção da matéria orgânica.

O uso de coagulantes férricos é justificado na relação entre os valores de Ferro e Carbono Orgânico Total (COT) na DFU, pois os sais ferrosos apresentam melhor eficiência na remoção da matéria orgânica quando comparado aos sais de alumínio (COSTA *et al*, 2000). O COT na Água Bruta (2,178 mg/L) é adepto aos valores apontados por Costa *et al* (2000) para águas superficiais. Em geral, esses valores são considerados baixos para o LETA e estão associados às características da Água Bruta.

Em tese, as características desses LETAs eram esperadas e concordou com as características do LETA de Estações do tipo Dupla Filtração, apresentando baixa turbidez e Concentração de Sólidos. Esse baixo teor de sólidos mostra uma oportunidade de avaliar o desaguamento por adensamento proposto nesta pesquisa.

Figura 9: Amostra Composta - Água de Estudo



Fonte: Próprio autor (2021)

7.2 Ensaios de Bancada

Aqui é apresentado os resultados alcançados para a análise de desempenho dos Métodos de Adensamento através da adição de polímeros com diferentes cargas. Primeiro é exibido o tratamento estatístico realizado através da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) em que foi avaliado a intervenção dos parâmetros de dosagem e da taxa de recirculação na concentração de sólidos e na turbidez do sobrenadante de LETA. Em seguida, os dados foram avaliados pelo método de comparação de médias Anova/Tukey possibilitou ponderar o efeito do tipo de carga polimérica no adensamento.

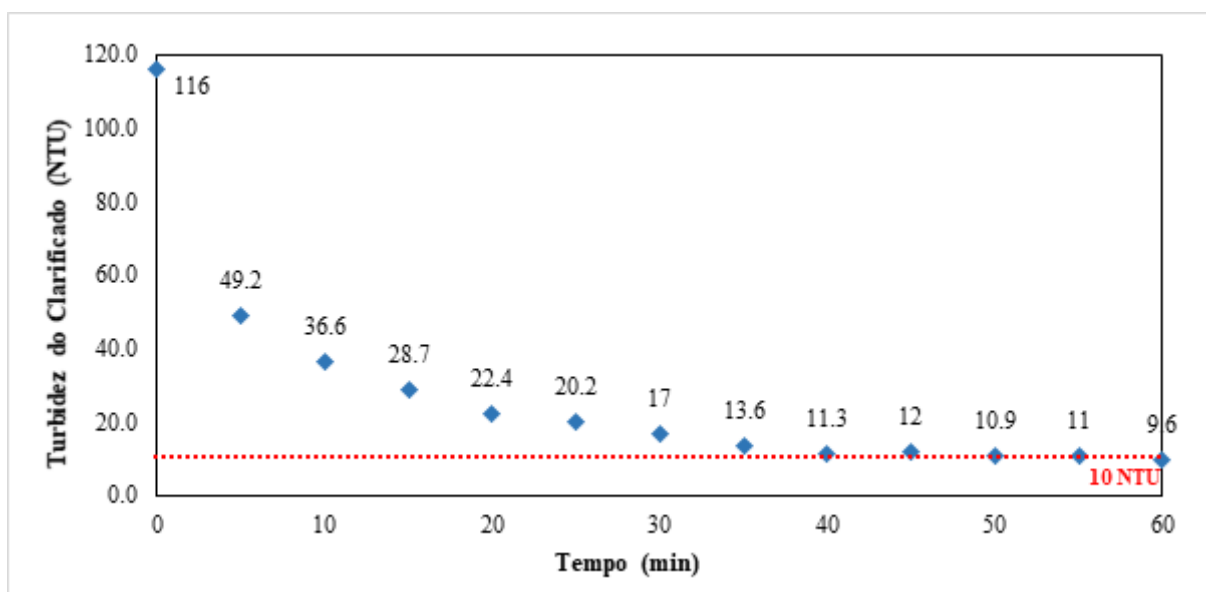
Foi feito o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para otimizar os ensaios de bancada. Ainda, suas variáveis de respostas são representadas pela Turbidez Remanescente do Sobrenadante, Velocidade de Adensamento/Sedimentação e Clarificação do LETA. Para o tratamento estatístico dos dados, foi considerado como premissa um nível de significância de 10%, ou seja, caso a variável (X1) contenha p-valor menor do que 0,10 são consideradas estatisticamente significativas na resposta e possuem um nível de confiança de 90%.

7.2.1 Turbidez do Sobrenadante

A Água de Recirculação deve ter Turbidez Remanescente de até 10 uT para ser apropriada, valor esse que é o conceituado pela literatura para a água afluenta aos filtros com intuito de apresentar boa eficiência da Filtração Lenta, resultando em produção de água com turbidez baixa e desinfecção final apropriada (DI BERNARDO *et al*, 1999). Assim, apenas foram considerados os ensaios que alcançaram eficácia na remoção de Turbidez superior à 90% da Água de Estudo (116 NTU), ou seja, os valores abaixo de 11,6 NTU para o Sobrenadante.

O gráfico da Figura 10 a seguir retrata que as amostras sem utilização de polímeros mostram eficiência após 50 min de ensaio, com Turbidez de Sobrenadante atingindo 10,9 NTU. Ainda, exibe a curva de Turbidez do Sobrenadante ao longo do tempo.

Figura 10: Adensamento por Gravidade - Turbidez Remanescente no LETA

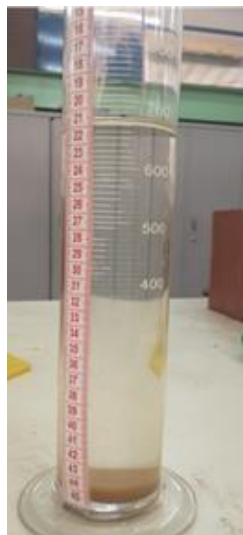


Fonte: Próprio autor (2021)

Do mesmo modo, para chegar a uma concentração final pretendida para o lodo adensado por gravidade é admitido um tempo necessário que reflita o valor da Turbidez imediatamente após a estabilização da zona de compressão. Assim, foi alcançada uma eficiência de remoção de 88,3%, ou seja, 13,6 NTU para Turbidez do Sobrenadante. O resultado era esperado, já que o LETA apresenta características particulares devido aos flocos formados e aos resíduos do tratamento que permite a

sedimentação de forma apropriada, ainda que precise de período superior a 30 min para alcançá-la.

Figura 11: Turbidez Remanescente - Adensamento por Gravidade



Fonte: Próprio autor (2021)

A Tabela 7 a seguir, mostra os dados de Turbidez do Sobrenadante resultante das três diferentes cargas de polímeros.

Tabela 7: Turbidez do Sobrenadante - DCCR do Adensamento por Gravidade

Ensaio	Variáveis X1 - Dosagem de Polímeros (mg Pol/gSST)	Tipo de Polímero		
		CAT	ANI	NION
1	1 (-1)	10,5	6,7	12,2
2	8 (+1)	2,6	2,1	2,9
3	0,34 (- α)	6,2	11,4	25,7
4	8,66 (+ α)	2,3	3,7	5,2
5	4,5 (0)	8,1	4,9	4,4
6	4,5 (0)	7,4	6,8	5,0
7	4,5 (0)	7,2	4,9	5,9

Fonte: Próprio autor (2021)

Atentando para as dosagens de polímeros determinadas, a Tabela 8 mostra o tratamento estatístico da Turbidez do Sobrenadante (Tsd) para os polímeros pesquisados. Assim, os valores de p-valor abaixo de 0,10 indicam um efeito estatístico da variável independente (X1) sobre a variável de interesse com nível de confiança de 90%.

Tabela 8: Análise p-valor da Turbidez - Adensamento por Gravidade

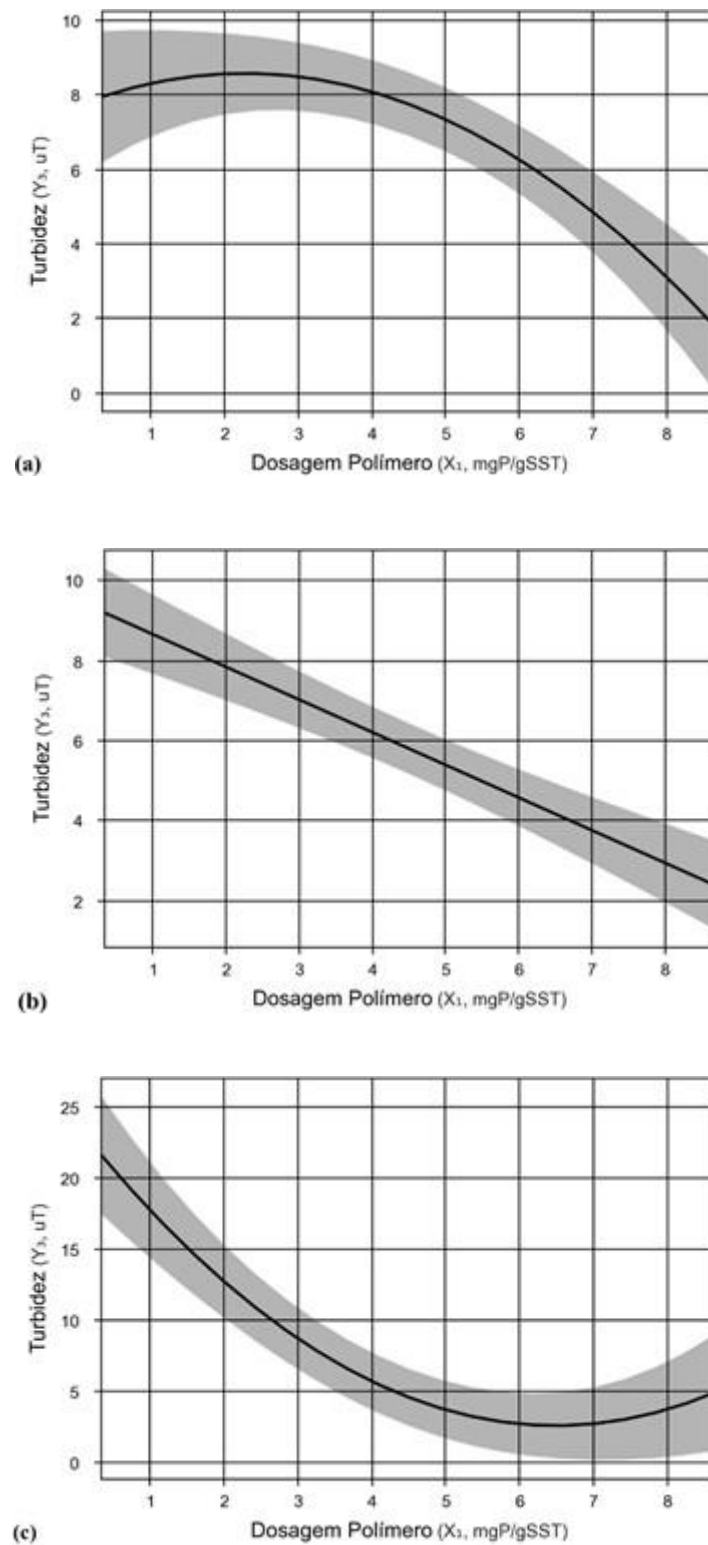
Variáveis	Tipo de Polímero		
	CAT	ANI	NION
X1-(L)	0,0188*	0,0131*	0,0123*
X1-(Q)	0,0904*	-	0,0467*

*p-valor $\leq 0,10$; L - Termos Lineares; Q – Termos Quadráticos

Fonte: Próprio autor (2021)

Ao considerar os valores de p-valor assumidos pela variável X1 (Dosagem de Polímero) nos ensaios de Adensamento por Gravidade pode-se garantir que a Dosagem de Polímeros tem efeito estatístico significativo para os três tipos de polímeros usados. Ao ser considerado somente os p-valores com significância estatística (p-valor $\leq 0,10$), foram desenvolvidos os modelos matemáticos que representam a relação observada entre a variável dependente e as variáveis de resposta. Com o uso da ANOVA para validação dos modelos matemáticos, gerou-se os gráficos da Figura 12 a seguir que mostra o comportamento da Turbidez do Sobrenadante (Tsd) em relação a Dosagem de Polímero com diferentes cargas (catiônico, aniônico e não-iônico). As demais informações aparecem no Apêndice A, deste trabalho.

Figura 12: Superfícies de resposta da Turbidez Remanescente - Adensamento por Gravidade



(a) Polímero Catiônico; (b) Polímero Aniônico; (c) Polímero Não-Iônico

Fonte: Próprio autor (2021)

O uso dos polímeros de carga Catiônica foram os que apresentaram melhores valores nos delineamentos com dosagens superiores a 2,42 mg Pol/gSST. Portanto, a partir do modelo matemático, é dado que, conforme é aumentado a dosagem de polímeros, tem-se uma redução na Tsd, e apresenta os mínimos valores nas regiões de máximo valor de X1.

Ainda, é observado o tempo necessário para alcançar esses parâmetros. Ao passo que para a Água de Estudo, sem uso de polímeros, foi preciso 40 min para chegar a 90% de remoção da turbidez; já para as amostras com polímeros, precisou apenas de 10 min. Logo, houve uma redução de 75% no tempo gasto para remover a turbidez.

Para a modelagem matemática dos Polímeros de carga Aniônica, tem-se uma redução na Tsd à proporção que é aumentado a dosagem. Todavia, a relação entre a variável independente e a variável de resposta é linear. Assim, tem-se os valores mínimos de Turbidez para a máxima dosagem.

Segundo os ensaios de Adensamento por Gravidade conclui-se que a adição de polímeros no adensamento eleva a eficiência da remoção dos sólidos, visto na redução da Turbidez do Sobrenadante (Tsd). Pela Tabela 7 já apresentada, percebe-se que todas as amostras de polímeros de carga aniônica e catiônica apresentam eficiência de remoção maior ou igual a 90%. Nessa comparação, os polímeros aniônicos têm mais eficácia na remoção da turbidez, e os polímeros catiônicos apresentam parâmetros melhores apenas nos pontos extremos definidos pelo DOE (0,34 e 8,66 mgPol/gSST). Já para os polímeros Não-Iônicos, a remoção de Turbidez não atingiu bons valores nas faixas de dosagem de 0,34 mgPol/gSST e de 1,0 mgPol/gSST. Em geral, teve melhor resultado para (Tsd) na faixa de dosagem de 8,0 mgPol/gSST.

7.2.2 Velocidade de Clarificação (Vcl)/Sedimentação (Vsd)

A Velocidade de Sedimentação (Vsd) e a Velocidade de Clarificação (Vcl) oferecem parâmetros básicos para a construção das unidades de adensamento por Gravidade. Obtém-se esses parâmetros a partir das curvas geradas da interface de clarificação/adensamento versus tempo.

7.2.2.1 Adensamento por Gravidade

A Tabela 9 a seguir, mostra os valores das Velocidades de Sedimentação e Clarificação das três diferentes cargas de polímeros obtidas através dos ensaios de Adensamento por Gravidade.

Tabela 9: V_{Cl} e V_{sd} - DCCR Adensamento por Gravidade

Ensaio	X_1 - Dosagem de Polímeros (mg Pol/gSST)	Velocidade de Clarificação (cm/min)			Velocidade de Sedimentação (cm/min)		
		CAT	ANI	NION	CAT	ANI	NION
1	1 (-1)	6,19	10,14	6,42	5,81	8,54	6,78
2	8 (+1)	11,67	15,91	11,86	10,98	13,05	9,60
3	0,34 (- α)	6,03	7,78	5,47	6,12	6,29	4,94
4	8,66 (+ α)	14,29	19,44	12,96	13,05	15,03	10,80
5	4,5 (0)	8,75	13,46	8,05	7,52	9,60	7,60
6	4,5 (0)	8,05	11,29	7,22	7,60	10,17	6,52
7	4,5 (0)	7,78	14,00	8,14	7,36	10,80	7,68

Fonte: Próprio autor (2021)

Na Tabela 10 adiante, é exposto o tratamento estatístico da Velocidade de Clarificação (V_{Cl}) e da Velocidade de Sedimentação (V_{sd}) para cada carga polimérica considerada durante o Adensamento por Gravidade. Percebe-se que todos os valores de p-valor que estão abaixo de 0,10 apontam para um efeito estatístico da variável independente (X_1) sobre a variável de resposta com nível de confiança acima de 90%.

Tabela 10: Velocidades de Clarificação e Sedimentação - Análise p-valor

Variáveis	Velocidade de Clarificação (V_{Cl})			Velocidade de Sedimentação (V_{sd})		
	CAT	ANI	NION	CAT	ANI	NION
$X_{1-(L)}$	0,0001*	0,0041*	0,0002*	0,0004*	0,0016*	0,0047*
$X_{1-(Q)}$	0,0045*	0,6857	0,1999	0,0353*	0,5120	0,3214

*p-valor $\leq 0,10$; L - Termos Lineares; Q – Termos Quadráticos

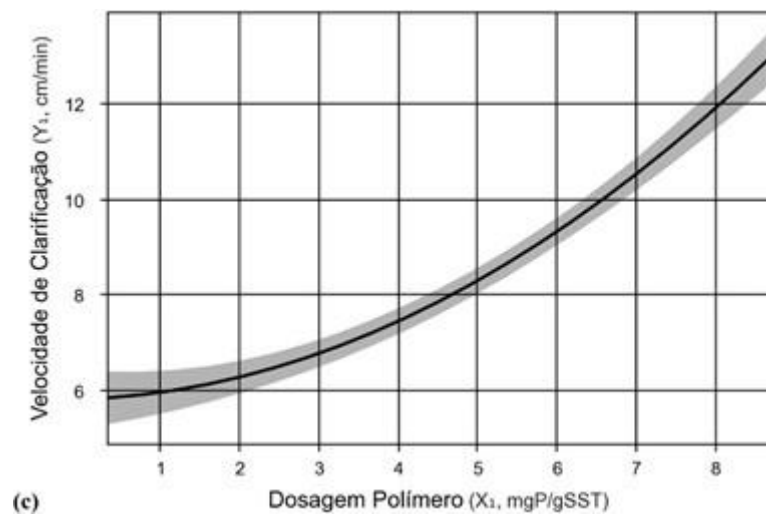
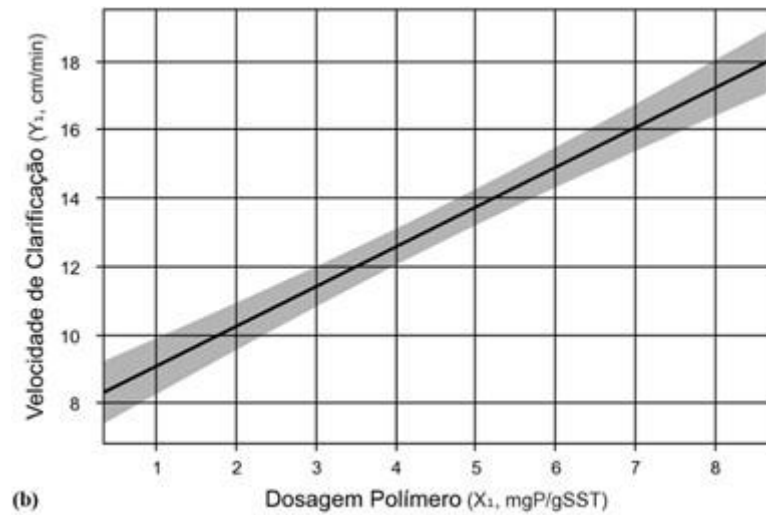
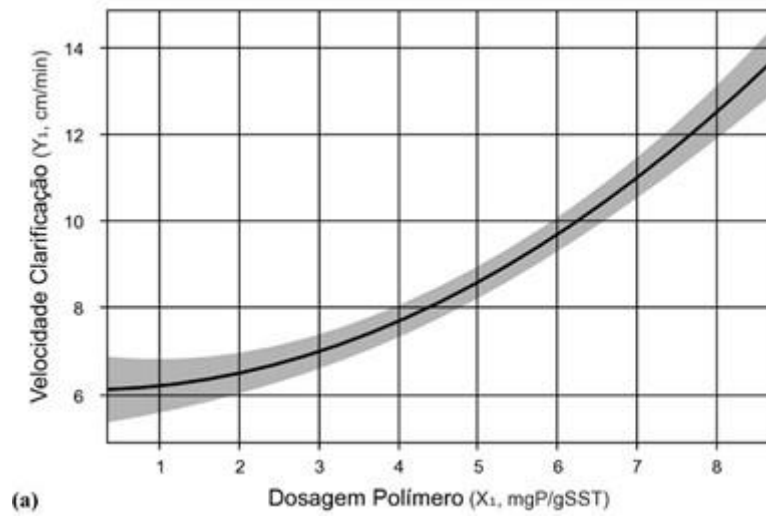
Fonte: Próprio autor (2021)

Ao se avaliar os valores de p-valor assumidos pela variável X_1 (Dosagem de Polímero) nos ensaios de Adensamento por Gravidade, percebe-se que a variável apresenta efeito estatístico significativo para os três tipos de polímeros empregados.

Segundo os p-valores com significância ($p\text{-valor} \leq 0,10$), foram realizados os modelos matemáticos que representam a relação observada entre a variável dependente e a variável de resposta com comportamento de forma linear. A partir da ANOVA para validar os modelos matemáticos foram produzidos gráficos. Todas essas informações são apresentadas no Apêndice deste trabalho.

Os gráficos da Figura 13 e Figura 14 a seguir mostram a modelagem matemática estabelecida para as Velocidades de Clarificação e Sedimentação em função da Dosagem de Polímero (X_1). Em geral, podemos perceber que a eficiência na adição de polímeros no LETA colabora no aumento da velocidade de sedimentação e clarificação dos pontos avaliados, alcançando melhores resultados em relação a quando não se faz o uso polimérico. Esperava-se tais resultados e houve concordância com valores encontrados nas pesquisas de Hedlund (2016), Lovo (2016), Matos e Girard (2013).

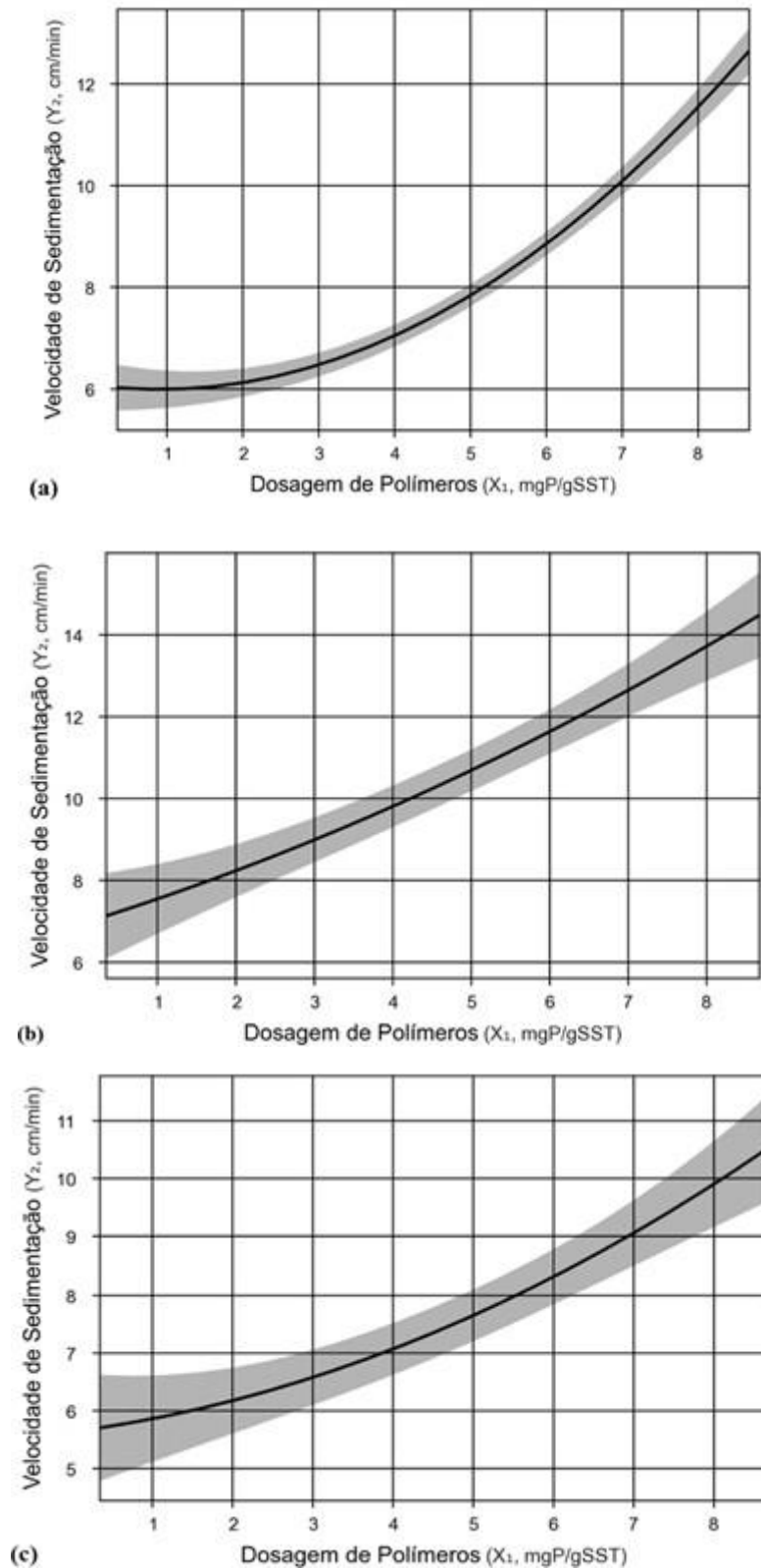
Figura 13: Superfícies de resposta da VCI - Adensamento por Gravidade



(a) Polímero Catiônico; (b) Polímero Aniônico; (c) Polímero Não-Iônico

Fonte: Autor (2021)

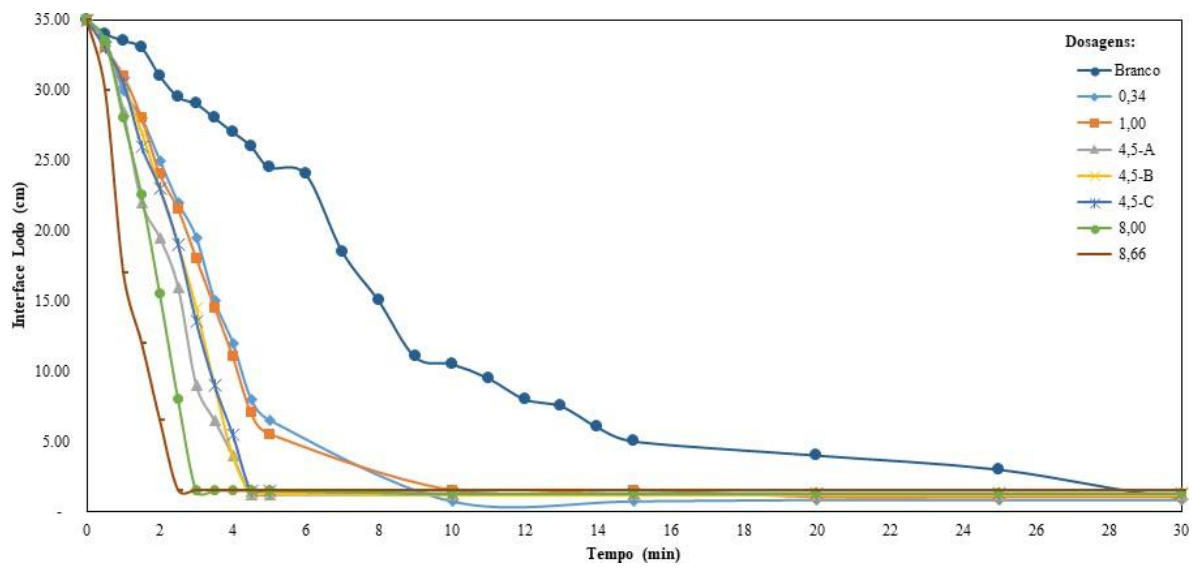
Figura 14: Superfícies de resposta da Vsd - Adensamento por Gravidade



Polímero Catiônico; (b) Polímero Aniônico; (c) Polímero Não-Iônico

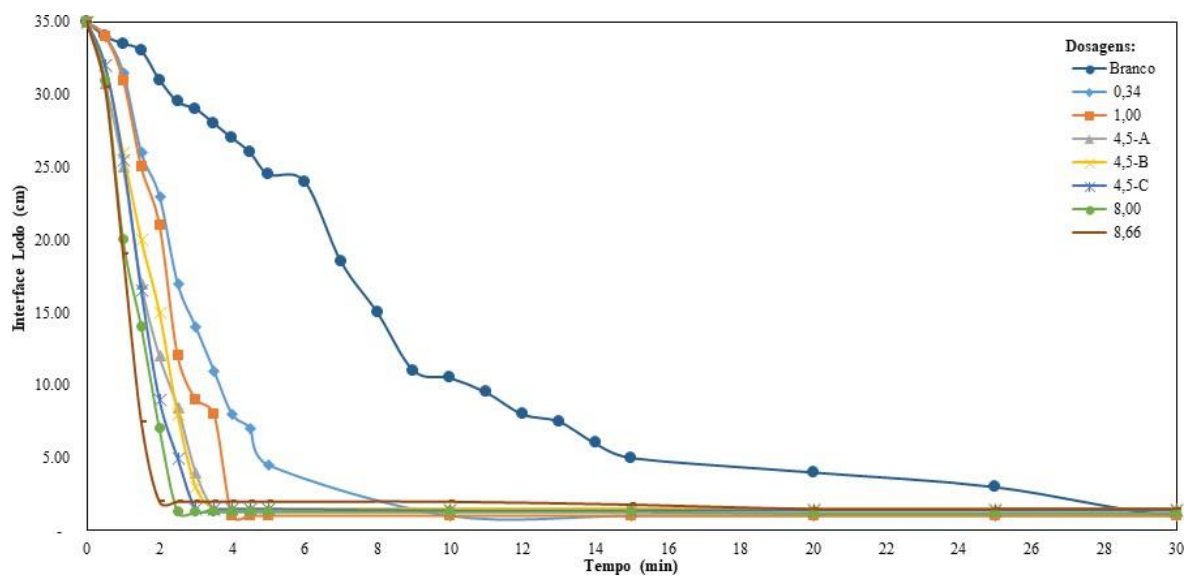
Fonte: Autor (2021)

Figura 15: Curvas de Adensamento por Gravidade - Polímero Catiônico



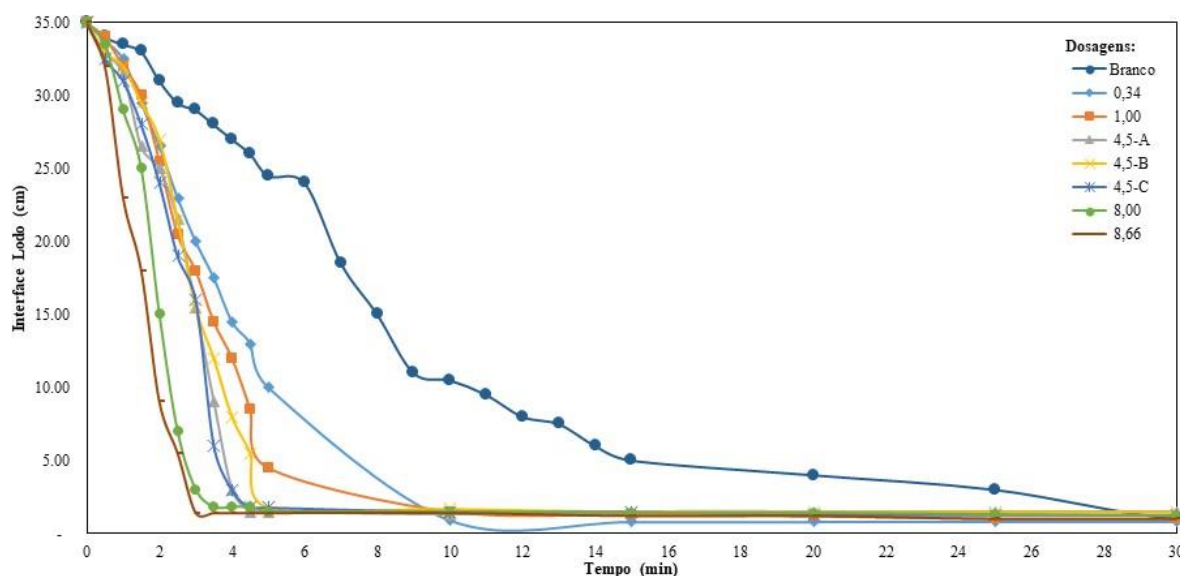
Fonte: Próprio autor (2021)

Figura 16: Curvas de Adensamento por Gravidade - Polímero Aniônico



Fonte: Próprio autor (2021)

Figura 17: Curvas de Adensamento por Gravidade - Polímero Não-Iônico

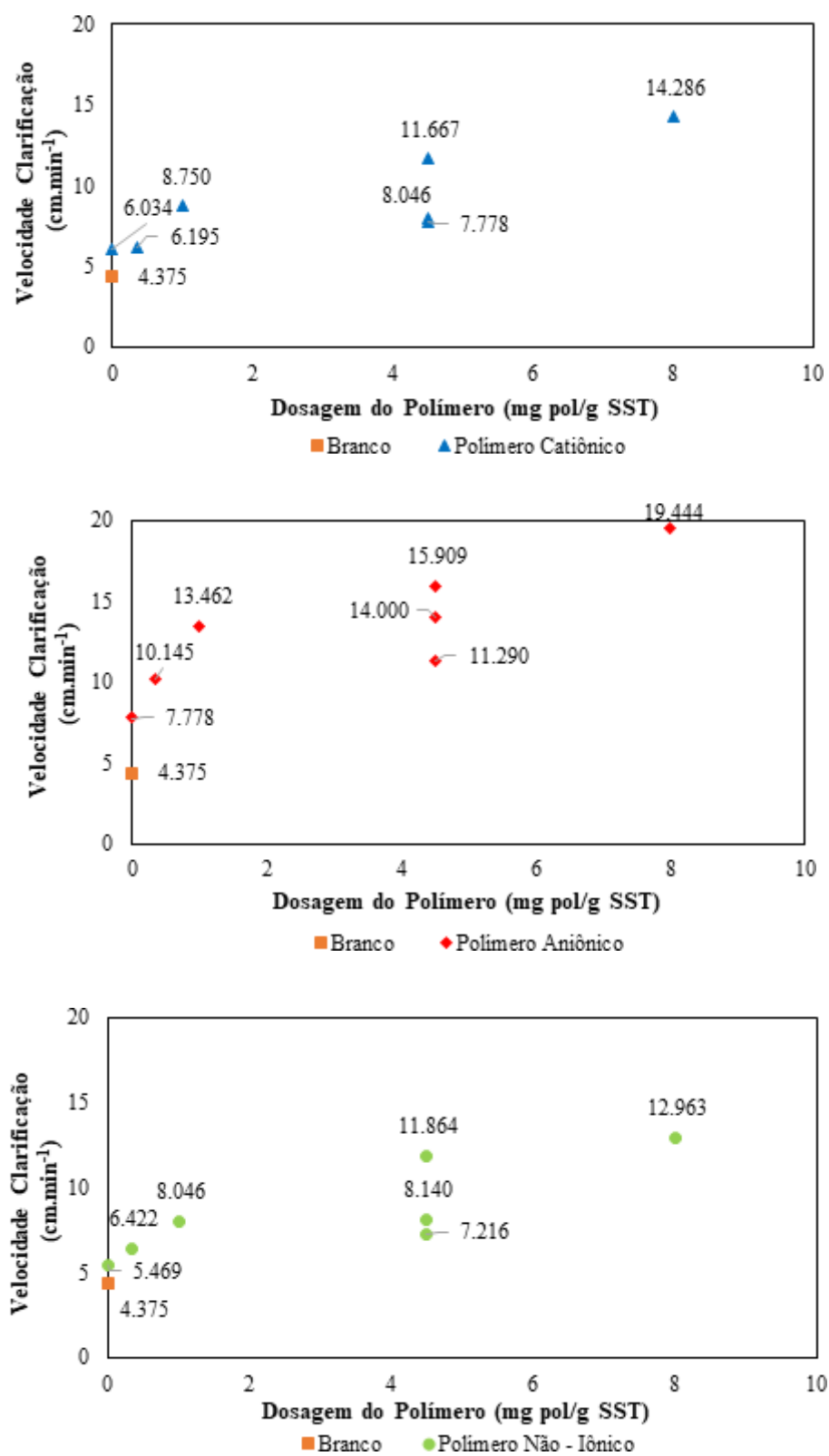


Fonte: Próprio autor (2021)

Pelas curvas de adensamento mostradas na Figura 15, Figura 16 e Figura 17 constatou-se que para ter estabilização do adensamento, o menor tempo é abaixo dos 4 minutos com a faixa de dosagem de 8,66 mgPol/gSST. Todavia, existe exceção para as faixas de 0,34 e 1,0 mgPol/gSST dos polímeros não-iônicos que precisaram de aproximadamente 10 minutos para estabilizar. Já as demais dosagens e cargas de polímeros necessitaram de até 5 minutos, da mesma maneira que foi constatado por Maraschin *et al* (2018) que observou as as velocidades máximas de clarificação ocorrendo nos minutos iniciais do ensaio de adensamento.

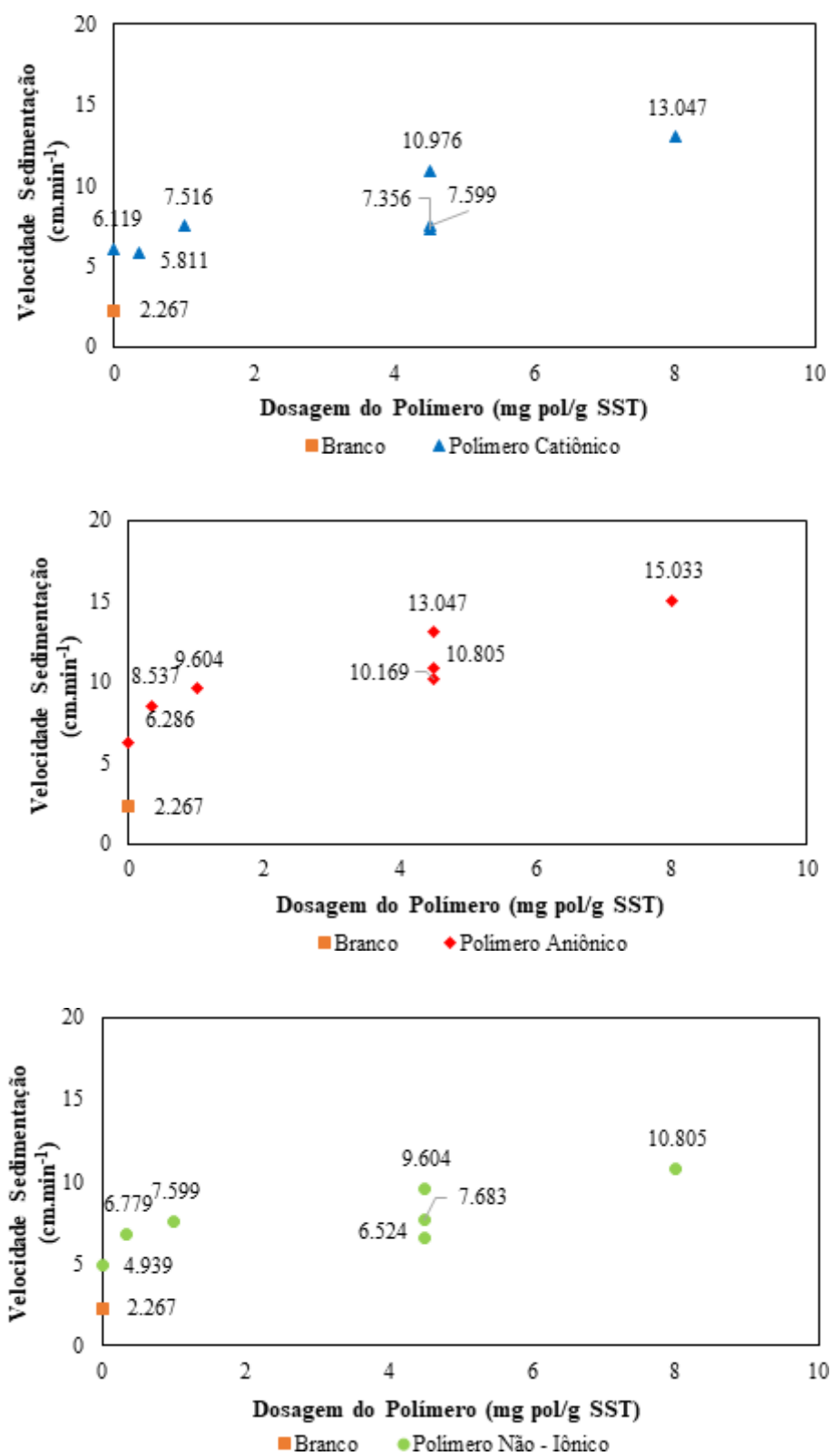
De acordo com os cálculos da VCI e da Vsd conseguidos pelas curvas de adensamento mostradas acima, percebe-se que os polímeros de carga aniônica mostram as duas velocidades superiores às demais cargas iônicas em todos os pontos verificados. Na Figura 18 e Figura 19 a seguir é mostrado os valores validados das Velocidades de Clarificação e Sedimentação dos LETAs com e sem a adição de polímeros.

Figura 18: Adensamento por Gravidade – Velocidade de Clarificação



Fonte: Próprio autor (2021)

Figura 19: Adensamento por Gravidade – Velocidade de Sedimentação



Fonte: Próprio autor (2021)

Observa-se que os maiores índices obtidos para as Velocidades de Clarificação e Sedimentação são encontrados para a dosagem de 8,66 mgPol/gSST. Para Velocidades de Clarificação, os maiores valores atingidos foram 14,29 cm/min, 19,44 cm/min e 12,96 cm/min para os polímeros catiônicos, aniônicos e não-iônicos, respectivamente. Já para a Velocidade de Sedimentação, os maiores valores foram 13,05 cm/min, 15,03 cm/min e 10,81 cm/min, seguindo a ordem anterior. Portanto, os melhores resultados foram para os polímeros aniônicos.

Ademais, os polímeros não-iônicos tiveram os menores índices de velocidades, o que era esperado uma vez que apresenta menor reatividade na carga. Contudo, ainda apresentam índices 3 vezes e 2,5 vezes maiores que os alcançados para as velocidades de clarificação e sedimentação do LETA sem o uso de polímeros.

Logo, baseado nas características do LETA e nas dosagens de polímeros avaliadas, a Velocidade de Clarificação e Sedimentação aumenta conforme é aumentado a Dosagem dos Polímeros (X1).

Ainda, é apresentado na tabela a seguir os parâmetros das amostras com aplicação de polímero e sem para os modelos que apresentaram significância estatística, sendo observado as variáveis de resposta (T_{sd} , V_{Cl} e V_{sd}). Para a Turbidez do Sobrenadante os melhores comportamentos são os das cargas iônicas, sendo que apresentam desempenho inferior às demais cargas apenas nos pontos extremos. Estes valores, são apresentados na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11: Tsd e Eficiência de Remoção: Adensamento por Gravidade - Polímero Aniônico

Dosagem (mgPol/gSST)	T_{sd} (NTU)	Eficiência de Remoção (%)
0,34	11,40	90,2%
1	6,67	94,3%
4,5-A	4,94	95,7%
4,5-B	6,80	94,1%
4,5-C	4,87	95,8%
8	2,06	98,2%
8,66	3,70	96,8%

Fonte: Próprio autor (2021)

Percebe-se a eficiência na redução da Turbidez devido ao uso de polímeros.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os LETAs usados na pesquisa apresentam características compatíveis de uma Estação do tipo Dupla Filtração, com baixa turbidez e concentração de sólidos.

O método estatístico Superfície de Resposta (RSM) apresentou eficiência para o planejamento experimental nos ensaios, geração, interpretação e otimização dos resultados atingidos pelo Adensamento por Gravidade.

A eficiência na remoção da turbidez pela adição de polímeros foi superior a 90% em todos os tipos.

A aplicação de polímeros reduziu em 75% o tempo para atingir valores de Turbidez inferiores a 10 NTU.

A estabilização da zona de compressão teve redução de até 89% com o uso de polímeros aniônicos, estabilizando em até 4 minutos após o início dos ensaios.

A aplicação de polímeros aumentou a Velocidade de Sedimentação e Clarificação em todos os pontos avaliados. Para os polímeros aniônicos, os valores de V_{Cl} e V_{sd} foram 19,44 cm/min e 15,03 cm/min, respectivamente, o que implica dizer, acréscimo de 344% e 244% em relação ao LETA sem o emprego de polímeros.

O Adensamento do LETA por Gravidade é viável devido às condições operacionais de uma ETA do Tipo Dupla Filtração.

REFERÊNCIAS

APHA. *American Water Works Association and Water Environmental Federation*. (2017). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23th edition, Washington, USA.

ANDREOLI, C.V. *et al.* Produção, Composição e Constituição de Lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA). In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Projeto PROSAB: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Curitiba: Abes, 2006. p. 398. Projeto PROSAB.

ARAÚJO, F. C. *et al.* Caracterização física do resíduo de uma estação de tratamento de água para sua utilização em materiais de construção. **Cerâmica**, [S.L.], v. 61, n. 360, p. 450-456, dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613601931>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: Abnt, 2004. 77 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: Abnt, 1984. 13 p

BONTON, A; BOUCHARD, C.; BARBEAU, B.; JEDRZEJAK, S. Comparative life cycle assessment of water treatment plants. **Desalination**. v. 284, p. 42 - 54, 2012.

BOURGEOIS, J.C; WALSH, M. E; GAGNON, G. A. Treatment of drinking water residuals: comparing sedimentation and dissolved air flotation performance with optimal cation ratios. **Water Research**, [S.L.], v. 38, n. 5, p. 1173-1182, mar. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2003.11.018>.

BRAGA, M. D. *et al.* 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**, vol. 1, n. 3, 2007. Disponível em www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/download/14421/13757. Acesso em: 25 ago. 2021.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Lei de Recursos Hídricos**. Brasília, DF, 08 jan. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 25 ago. 2021.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Lei de Crimes Ambientais**. Brasília, DF, 12 fev. 1998. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm. Acesso em: 25 ago. 2021.

BRASIL. Resolução nº 357, de 17 de março de 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. **Enquadramento dos Corpos Hídricos**. Brasília, DF, 17 mar. 2005. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 25 ago. 2021.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento - SNIS. **Diagnósticos SNIS 2019**. 2020. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnosticos>. Acesso em: 20 dez. 2020.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento - SNIS. **25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto**. Brasília: SNS/MDR, 2020. 190 p.

CARVALHO, E. H. **Disposição de Resíduos Gerados nas Estações de Tratamento de Água em Estações de Tratamento de Esgoto com Decantação Primária**. 2000. 225 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2000.

CHAVES, K. O. **Desenvolvimento e Aplicação de Sistema de Floco-Flotação por Ar Dissolvido para Tratamento de Água de Lavagem do Filtro da ETA Gavião**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

CORDEIRO, J. S. Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs. In: REALI, M. A. P. (Coord.). **Projeto PROSAB: Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro: Abes, 1999. p. 233. Projeto PROSAB.

CORDEIRO, J. S. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Projeto PROSAB: Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos**. Curitiba: Abes, 2001. p. 273. Projeto PROSAB.

CORNWELL, D. A. *et al.* **Handbook of Practice Water Treatment Plant Waste Management**. 1 ed. Virgínia: American Water Works Association Research Foundation, Denver, 1987. 431 p.

COSTA, B. M. P. *et al.* AVALIAÇÃO DA RELEVÂNCIA DO CARBONO ORGÂNICO TOTAL COMO PARÂMETRO DE CARACTERIZAÇÃO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, s.l, v. 5, n. 4, p. 41-55, out. 2000. DOI: 10.21168/rbrh.v5n4.p41-55. ISSN 2318-0331

DI BERNARDO, L. *et al.* **Tratamento de Águas de Abastecimento por Filtração em Múltiplas Etapas**. 1999. Disponível em: http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/aguas_de_abastecimento.pdf. Acesso em: 09 out. 2021.

DI BERNARDO, A. S. *et al.* Influência do Tempo de Aplicação de Polímeros na Eficiência da Floculação / Sedimentação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17., 2000, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Abes, 2000. p. 1-13.

DI BERNARDO, L. *et al.* **Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. 1. ed. São Carlos: Ed.RiMa, 2002.

DI BERNARDO, L.; PÁDUA, V. L.; DI BERNARDO, A. S.

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

DI BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**. v. 1 e 2. São Carlos: LDiBe, 2008. 1560 p.

DI BERNARDO, L. *et al.* **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. Editora LDiBe, São Carlos – SP, 2012. 454 p.

FERREIRA FILHO, S.S. **Pré-condicionamento de lodos de estações de tratamento de água visando o seu adensamento por gravidade**. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1997, Foz do Iguaçu, Anais... PR: Foz do Iguaçu, 1997.

FERREIRA FILHO, S. S. **Tratamento de Água: Concepção, Projeto e Operação de estações de tratamento**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.461 p.

FONTANA, A.O. **Sistema de Leito de Drenagem e Sedimentador Como Solução Para Redução de Volume de Lodo de Decantadores e Reuso de Água de Lavagem de Filtros - Estudo de Caso – ETA Cardoso**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos/UFSCAR. São Carlos. 2004.

GONÇALVES, F. R. *et al.* Desidratação do Lodo de Esgotos. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Projeto PROSAB: Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos**. Curitiba: Abes, 2001. p. 273. Projeto PROSAB.

GUIMARÃES, G. C. **Estudo do Adensamento e Desidratação dos Resíduos Gerados na ETA Brasília**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

HAAK, Wando. **Condicionamento Químico de Lodo de Estação de Tratamento de Água com Monitoramento Através de Potencial REDOX**. 2011. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

HEDLUND, K. F. S. **Adensamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água: comparação entre sedimentação e flotação**. 2016. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

HOSOKAWA, T. *et al.* Kurita Water Industries (ed.). **Kurita Handbook of Water Treatment**. 2. ed. S.L: Kurita Water Industries, 1999. 501 p.

IBGE (Brasil). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. 2008. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pnsb/pnsb-2008>. Acesso em: 26 ago. 2020.

ISMAIL, I. A. L. *et al.* **Polímeros Sintéticos e Naturais em Tratamento de Resíduos de ETA**. 2019. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/polimeros-sinteticos-naturais-residuos-eta/>. Acesso em: 18 ago. 2020.

JACOMASSI, F. E. **Estudo das Micropropriedades de Resíduos Sólidos Gerados nos Decantadores de Estações de Tratamento de Água**. 2009. 119 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da Produção de Lodo de Estações de Tratamento de Água de Ciclo Completo: uma análise crítica**. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

KEMMER, F. N. Nalco Chemical Company (ed.). **The Nalco Water Handbook**. 2. ed. S.L: Nalco Chemical Company, 1987. 1071 p.

LANDIM, A. S. **Avaliação e Estudo sobre o Uso de Alguns Polímeros como Auxiliares de Coagulação, Floculação, e Flotação nas Estações de Tratamento de Água e Esgoto do Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia-MG (DMAE-MG)**. 2005. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Pós-Graduação do Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005

LIMA, R. M. **Desaguamento do Lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA) 006 da Cidade de Palmas-TO, por Meio de Polímeros e Filtração em Geotêxtil**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

LOVO, I. A. **Avaliação do Adensamento por Gravidade e do Desaguamento por Centrifugação do Lodo Gerado pelo Tratamento de Água**. 2016. 296 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2016.

LUSTOSA, J. B. *et al.* Tratamento e Aproveitamento de Água de Lavagem de Filtro em Estação de Tratamento de Água. **Revista Dae**, Palmas, v. 2016, n. 027, p. 44-61, jun. 2016.

MARASCHIN, M. *et al.* Floculação do lodo de ETA: Variáveis e mecanismos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 6., 2018, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: CITMA, 2018. p. 1-6.

MATTOS, Marcia Regina Uchoa; GIRARD, Luiza. Caracterização Físico-Química e Ensaio de Adensamento em Coluna de Lodo Produzido em uma Estação de Tratamento de Água de Grande Porte. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 28, p. 34-43, jun. 2013. ISSN 2176-9478.

MEYERS, R. H.; *et al.* **Response Surface Methodology**. 4. ed. New Jersey: Wiley, 2016. 855 p.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. Arizona: Courier Westford, 2013. ISBN 978-1-118-14692-7.

NUNES, P. N.; ALÉM SOBRINHO, P. Dimensionamento de Adensadores por Gravidade. **Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária y Ambiental**, Cancún, p. 1-9, out. 2002.

PAIVA, G. S. *et al.* Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA): Resíduo ou Insumo? In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 7., 2016, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: IBEAS, 2016. p. 1-11.

PEREIRA, S. L.M. **Características Físicas, Químicas e Microbiológicas do Lodo das Lagoas da ETA Gramame**. 2011. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

POZZOBON, J. C. *et al.* Avaliação Microbiológica de Lodo de ETA Seco em Diferentes Leitos de Secagem Artesanais. In: ENCONTRO NACIONAL DE DIFUSÃO TECNOLÓGICA, 7., 2010, Medianeira. **Anais [...]**. Medianeira: UFTPR, 2010. p. 1-9.

QUEIROZ, S. C. B. **Influência das Características da Água Bruta no Desaguamento de Resíduos Gerados no Tratamento de Água pela Filtração em Tubo Geotêxtil**. 2019. 226 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologia, Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2019.

REALI, M. A. P. Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETAs. In: REALI, M. A. P. (Coord.). **Projeto PROSAB: Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro: Abes, 1999. p. 233. Projeto PROSAB.

REALI, M. A. P.; PATRIZZI, L. J. Espessamento de Lodos de ETAs. In: REALI, M. A. P. (Coord.). **Projeto PROSAB: Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro: Abes, 1999. p. 233. Projeto PROSAB.

REALI, M. A. P. *et al.* In: Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária e Ambiental, 22., 2003, Joinville – Santa Catarina. **Flotação por Ar Dissolvido Aplicada na Clarificação de Águas que Apresentam Picos de Turbidez**. Santa Catarina: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – Abes, 2003.

REALI, M. A. P. *et al.* Comparison of Thickening of Sludges Produced in Two Water Treatment Plants by Using DAF and Gravity. **Minerva Pesquisa e Tecnologia**, São Carlos, v. 2, n. 2, p. 195-201, 2019.

RICHTER, C.A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001.

SARTORI, L. **Influência do Uso de Polímeros Sintéticos no Desempenho da Flotação por Ar Dissolvido Aplicada no Tratamento de Água para**

Abastecimento. 1998. 248 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Hidráulica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1998.

SCALIZE, P. S. **Disposição de Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água em Estações de Tratamento Esgoto**. 2003. 171 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

SENS, M. L. *et al.* Remoção e Transformação de Agrotóxicos. In: PÁDUA, Valter Lúcio de (coord.). **Projeto PROSAB: Remoção de Microorganismos Emergentes e Microcontaminantes Orgânicos no Tratamento de Água para Consumo Humano**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 394. Projeto PROSAB.

SILVA JÚNIOR, A.P., ISAAC, R.L. (2002) Adensamento por Gravidade de Lodo de ETA Gerado em Decantador Convencional e Decantador Laminar. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL 28, Cancún – México. **Anais...** Cancún: AIDIS, 2002.

SILVEIRA, A. C. H. **Caracterização dos Resíduos Gerados em Estação de Tratamento de Dupla Filtração com o Uso de Polímeros**. 2014. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2014.

SILVEIRA, C.; *et al.* Desaguamento do lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem/secagem. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 297-306, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522015020000082264>.

SILVEIRA, A. C. H. *et al.* Clarificação e Adensamento de Resíduos Gerados em ETA de Dupla Filtração com o Uso de Polímeros Sintéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 29., 2017, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Abes, 2017. p. 1-6.

SOUZA, L. M.; SCALIZE, P. S. Resistência específica do material sedimentado em ensaio de Jar Test, obtido com a adição de lodo de Estação de Tratamento de Água. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, S.L, v. 29, n. 3, p. 45-50, ago. 2013. ISSN 0102-9843

TEIXEIRA, L. C. G. M.; FERREIRA FILHO, S. S.. **Influência do tipo e da dosagem de polímero na capacidade de pré-adensamento de lodos gerados em estações de tratamento de água**. In: 20 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1999, RIO JANEIRO. 20 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. RIO DE JANEIRO: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1999.

VERRELLI, D. I.; DIXON, D.R.; SCALES, P. J. Assessing dewatering performance of drinking water treatment sludges. **Water Research**. v. 44, p. 152 - 1552, 2010.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

APÊNDICE

TRATAMENTO ESTATÍSTICO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PROPOSTO – DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL

Adensamento por Gravidade: Polímero Catiônico

- Turbidez do Sobrenadante

Tabela 12: Resultados da Regressão da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Catiônico – Adensamento por Gravidade

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	7,73	0,85	9,08	0,0008
X ₁	-2,61	0,68	-3,82	0,0188
X ₁ ²	-2,04	0,92	-2,22	0,0904

Fonte: Próprio autor (2021)

Modelo estatístico para p-valor ≤ 0,10: $Y = 7,73 - 2,61 x_1 - 2,04 x_1^2$

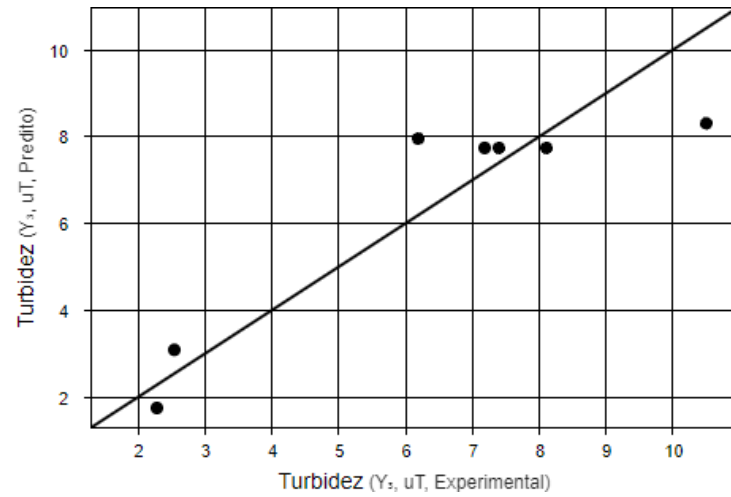
Tabela 13: Análise de Variância da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Catiônico – Adensamento por Gravidade

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	44,0	2	22,0	9,8	0,02891
Resíduos	9,0	4	2,3		
Falta de Ajuste	8,6	2	4,3	18,9	0,05035
Erro Puro	0,5	2	0,2		
Total	53,0	6			

Fonte: Próprio autor (2021)

R²: 83,00%

Figura 20: Valores Experimentais *versus* Valores Preditos do modelo matemático para a Turbidez do Sobrenadante no Adensamento por Gravidade com Polímero Catiônico



Fonte: Próprio autor (2021)

- Velocidade de Clarificação

Tabela 14: Resultados da Regressão da Velocidade de Clarificação com Polímero Catiônico – Adensamento por Gravidade

Nome	Coeficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	8,11	0,37	22,08	0,0000
X₁	3,17	0,30	10,73	0,0004
X₁²	1,24	0,40	3,13	0,0353

Fonte: Próprio autor (2021)

Modelo estatístico para $p\text{-valor} \leq 0,10$: $Y = 8,11 + 3,17 x_1 + 1,24 x_1^2$

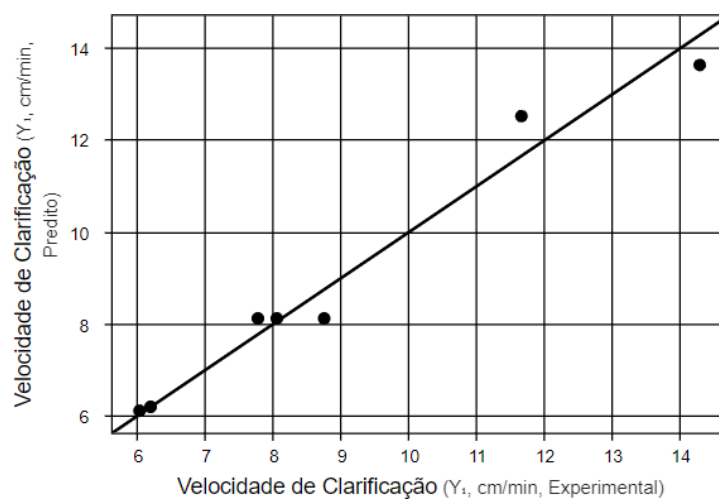
Tabela 15: Análise de Variância da Velocidade de Clarificação com Polímero Catiônico – Adensamento por Gravidade

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	52,5	2	26,2	62,5	0,00096
Resíduos	1,7	4	0,4		
Falta de Ajuste	1,2	2	0,6	2,3	0,29985
Erro Puro	0,5	2	0,3		
Total	54,2	6			

Fonte: Próprio autor (2021)

R²: 96,90%

Figura 21: Valores Experimentais *versus* Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por Gravidade com Polímero Catiônico



Fonte: Próprio autor (2021)

- Velocidade de Sedimentação

Tabela 16: Resultados da Regressão da Velocidade de Sedimentação com Polímero Catiônico – Adensamento por Gravidade

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	7,42	0,22	34,22	0,0000
X₁	2,78	0,17	15,95	0,0001
X₁²	1,35	0,23	5,75	0,0045

Fonte: Próprio autor (2021)

Modelo estatístico para $p\text{-valor} \leq 0,10$: $Y = 7,42 + 2,78 x_1 + 1,35 x_1^2$

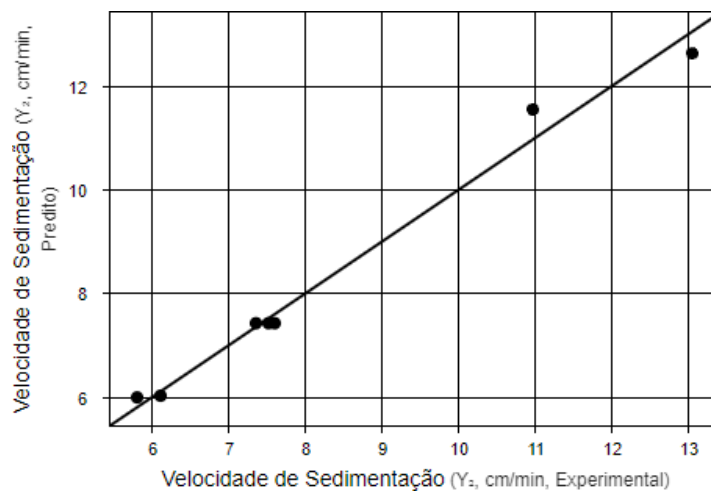
Tabela 17: Análise de Variância da Velocidade de Sedimentação com Polímero Catiônico – Adensamento por Gravidade

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	42,0	2	21,0	143,7	0,00019
Resíduos	0,6	4	0,1		
Falta de Ajuste	0,6	2	0,3	18,2	0,05213
Erro Puro	0,0	2	0,0		
Total	42,6	6			

Fonte: Próprio autor (2021)

R²: 98,63%

Figura 22: Valores Experimentais *versus* Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Sedimentação no Adensamento por Gravidade com Polímero Catiônico



Fonte: Próprio autor (2021)

Adensamento por Gravidade: Polímero Aniônico

- Turbidez do Sobrenadante

Tabela 18: Resultados da Regressão da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Aniônico – Adensamento por Gravidade

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	5,78	0,63	9,18	0,0003
X ₁	-2,85	0,79	-3,61	0,0131
X ₁ ²	-	-	-	-

Fonte: Próprio autor (2021)

Modelo estatístico para $p\text{-valor} \leq 0,10$: $Y = 5,78 - 2,85 x_1$

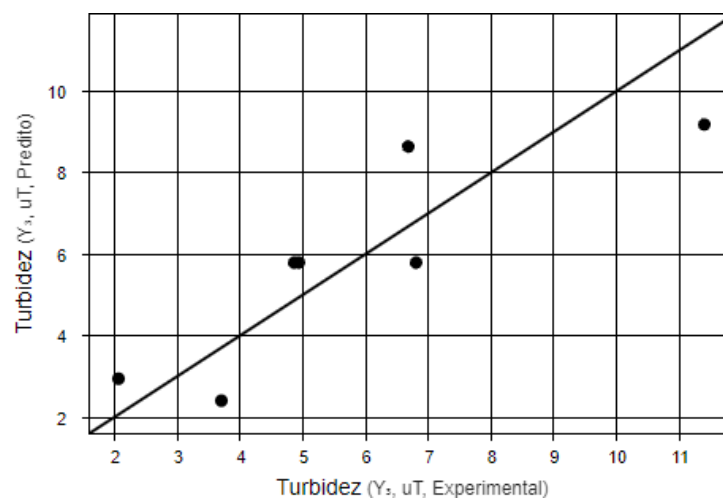
Tabela 19: Análise de Variância da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Aniônico – Adensamento por Gravidade

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	39,3	1	39,3	14,2	0,01312
Resíduos	13,9	5	2,8		
Falta de Ajuste	11,5	3	3,8	3,2	0,24775
Erro Puro	2,4	2	1,2		
Total	53,1	6			

Fonte: Próprio autor (2021)

R²: 73,90%

Figura 23: Valores Experimentais *versus* Valores Preditos do modelo matemático para a Turbidez do Sobrenadante no Adensamento por Gravidade com Polímero Aniônico



Fonte: Próprio autor (2021)

- Velocidade de Clarificação

Tabela 20: Resultados da Regressão da Velocidade de Clarificação com Polímero Aniônico – Adensamento por Gravidade

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	13,15	0,52	25,20	0,0000
X₁	4,07	0,63	6,47	0,0013
X₁²	-	-	-	-

Fonte: Próprio autor (2021)

Modelo estatístico para $p\text{-valor} \leq 0,10$: $Y = 13,15 + 4,07 x_1$

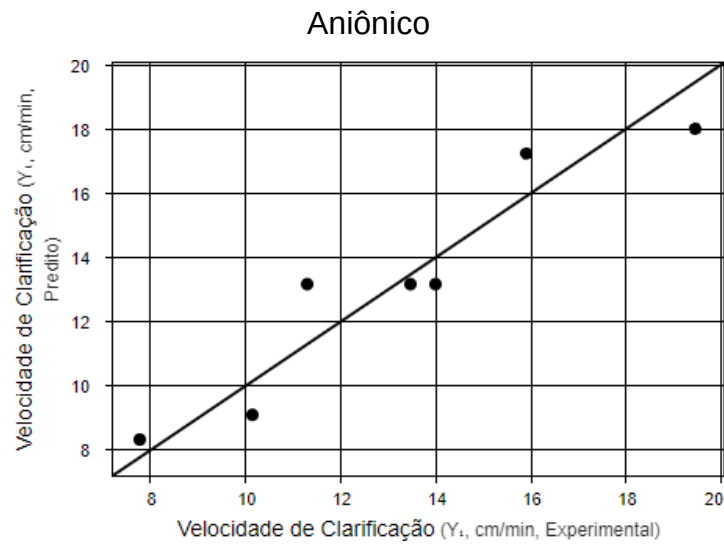
Tabela 21: Análise de Variância da Velocidade de Clarificação com Polímero Aniônico – Adensamento por Gravidade

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	79,9	1	79,9	41,9	0,00131
Resíduos	9,5	5	1,9		
Falta de Ajuste	5,4	3	1,8	0,9	0,57198
Erro Puro	4,1	2	2,1		
Total	89,4	6			

Fonte: Próprio autor (2021)

R²: 89,34%

Figura 24: Valores Experimentais *versus* Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por Gravidade com Polímero



Fonte: Próprio autor (2021)

- Velocidade de Sedimentação

Tabela 22: Resultados da Regressão da Velocidade de Sedimentação com Polímero Aniônico – Adensamento por Gravidade

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	10,50	0,32	32,74	0,0000
X ₁	3,09	0,39	8,00	0,0005
X ₁ ²	-	-	-	-

Fonte: Próprio autor (2021)

Modelo estatístico para p-valor ≤ 0,10: $Y = 10,50 + 3,09 x_1$

Tabela 23: Análise de Variância da Velocidade de Sedimentação com Polímero Aniônico – Adensamento por Gravidade

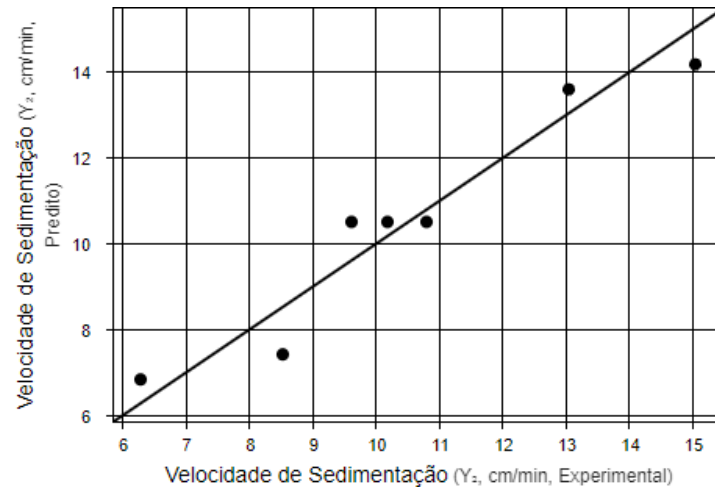
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	46,1	1	46,1	64,0	0,00049
Resíduos	3,6	5	0,7		
Falta de Ajuste	2,9	3	1,0	2,7	0,28537
Erro Puro	0,7	2	0,4		
Total	49,7	6			

Fonte: Próprio autor (2021)

R²: 92,75%

Figura 25: Valores Experimentais *versus* Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Sedimentação no Adensamento por Gravidade com Polímero

Aniônico



Fonte: Próprio autor (2021)

Adensamento por Gravidade: Polímero Não-Iônico

- Turbidez do Sobrenadante

Tabela 24: Resultados da Regressão da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Não-Iônico – Adensamento por Gravidade

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	4,50	2,01	2,24	0,0884
X ₁	-6,99	1,61	-4,33	0,0123
X ₁ ²	6,17	2,17	2,84	0,0467

Fonte: Próprio autor (2021)

Modelo estatístico para $p\text{-valor} \leq 0,10$: $Y = 4,50 - 6,99 x_1 + 6,17 x_1^2$

Tabela 25: Análise de Variância da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Não-Iônico – Adensamento por Gravidade

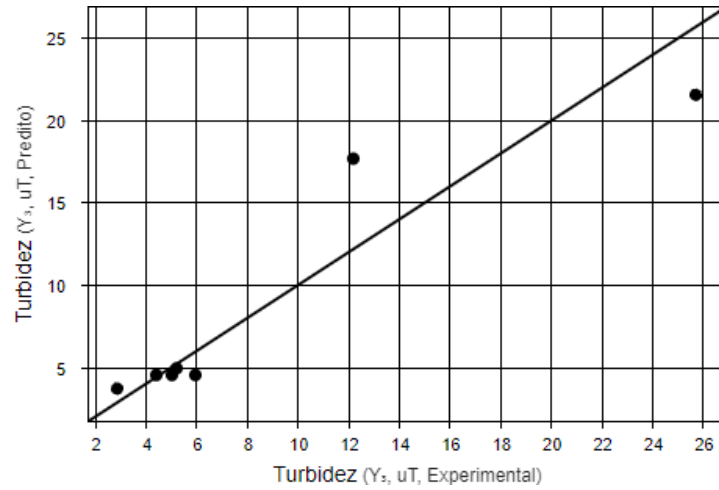
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	337,3	2	168,7	13,4	0,01679
Resíduos	50,2	4	12,6		
Falta de Ajuste	49,0	2	24,5	40,7	0,02400
Erro Puro	1,2	2	0,6		
Total	387,5	6			

Fonte: Próprio autor (2021)

R²: 87,04%

Figura 26: Valores Experimentais *versus* Valores Preditos do modelo matemático para a Turbidez do Sobrenadante no Adensamento por Gravidade com Polímero

Não-Iônico



Fonte: Próprio autor (2021)

- Velocidade de Clarificação

Tabela 26: Resultados da Regressão da Velocidade de Clarificação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por Gravidade

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	7,84	0,27	29,45	0,0000
X ₁	2,97	0,21	13,90	0,0002
X ₁ ²	1,08	0,29	3,76	0,0199

Fonte: Próprio autor (2021)

Modelo estatístico para p-valor ≤ 0,10: $Y = 7,84 + 2,97 x_1 + 1,08 x_1^2$

Tabela 27: Análise de Variância da Velocidade de Clarificação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por Gravidade

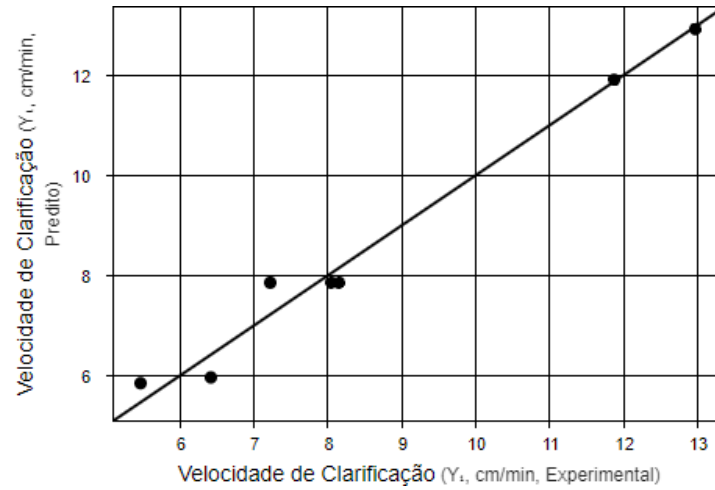
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	45,8	2	22,9	103,7	0,00036
Resíduos	0,9	4	0,2		
Falta de Ajuste	0,4	2	0,2	0,7	0,58540
Erro Puro	0,5	2	0,3		
Total	46,7	6			

Fonte: Próprio autor (2021)

R²: 98,11%

Figura 27: Valores Experimentais *versus* Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por Gravidade com Polímero

Não-Iônico



Fonte: Próprio autor (2021)

- Velocidade de Sedimentação

Tabela 28: Resultados da Regressão da Velocidade de Sedimentação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por Gravidade

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	7,70	0,30	25,34	0,0000
X₁	2,03	0,37	5,54	0,0026
X₁²	-	-	-	-

Fonte: Próprio autor (2021)

Modelo estatístico para $p\text{-valor} \leq 0,10$: $Y = 7,70 + 2,03 x_1$

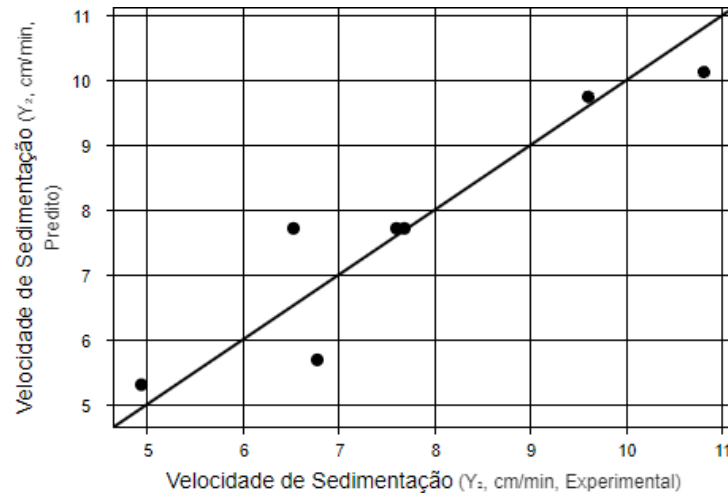
Tabela 29: Análise de Variância da Velocidade de Sedimentação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por Gravidade

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	19,9	1	19,9	30,7	0,00262
Resíduos	3,2	5	0,6		
Falta de Ajuste	2,4	3	0,8	1,9	0,36094
Erro Puro	0,8	2	0,4		
Total	23,1	6			

Fonte: Próprio autor (2021)

R²: 86,01%

Figura 28: Valores Experimentais *versus* Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Sedimentação no Adensamento por Gravidade com Polímero Não-Iônico



Fonte: Próprio autor (2021)