



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

PEDRO FILIPE LIMA SILVA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO
NO ADENSAMENTO DO LODO DE ETA.**

Palmas/TO
2022



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

PEDRO FILIPE LIMA SILVA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO
NO ADENSAMENTO DO LODO DE ETA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel do Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, *Campus Palmas*.

Orientador: Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva.

Palmas/TO
2022

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

S586a Silva, Pedro Filipe Lima
ANÁLISE DE DESEMPENHO DA FLOTAÇÃO POR AR
DISSOLVIDO NO ADENSAMENTO DO LODO DE ETA / Pedro Filipe
Lima Silva. – Palmas, TO, 2022.
87 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, 2022.

Orientador: Dr. Giulliano Guimarães Silva Guimarães

1. Dupla Filtração. 2. Flotação Por Ar Dissolvido. 3. Polímeros. I.
Guimarães, Giulliano Guimarães Silva. 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

PEDRO FILIPE LIMA SILVA

ANÁLISE DE DESEMPENHO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO NO ADENSAMENTO 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: 19/04/2022

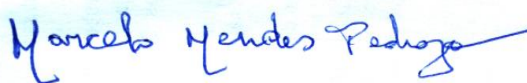
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Giuliano Guimarães Silva
Orientador – IFTO



Prof. Me. Gabriel Antônio Ribeiro Souza
Examinador – IFTO



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedrosa
Examinador – IFTO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a oportunidade de está concluindo mais uma etapa na minha vida. Que apesar de todas as dificuldades passadas durante o curso e na vida de estudante sempre estive firme, e isso é uma oportunidade que poucas pessoas tem. Pois conhecimento é algo que carregamos para vida e ninguém pode nos tirar.

Quero agradecer também pela paciência, colaboração e incentivo dos meus pais Valquírio José Lima Pereira e Eliana da Silva Filho que tanto amo e foram de extrema importância para a conclusão da minha formação e, portanto, desse trabalho.

Agradeço a minha companheira de vida e muito amada Karinny Vieira Costa, que durante todo meu percurso no curso de Engenharia Civil e na construção desse trabalho sempre me apoiou, colaborou e esteve forte mesmo em momentos difíceis.

Ao Prof.º Dr. Giuliano Guimarães meu orientador nesse trabalho e responsável por ter me dado muitas oportunidades de aprendizado e conhecimento no decorrer do curso de Engenharia Civil.

Além de, também, todos professores do Curso de Engenharia Civil do IFTO Campus Palmas, que com seus vastos conhecimentos e matérias proporcionaram a minha formação profissional.

Pela colaboração e amizade do Wendel da Silva, Rafaella Neres, Leonardo Figueiredo e Cayo Nunes construídas no laboratório. Sem dúvidas foram de importância crucial para a realização desse trabalho. Foi um prazer enorme compartilhar meu tempo com vocês nesses dias de pesquisa.

Por fim quero agradecer a todas as pessoas que sempre estiveram do meu lado contribuindo para ajudar na minha vida profissional e espiritual e que, portanto, tiveram sua influência indiretamente no resultado desse trabalho.

RESUMO

SILVA, Pedro Filipe Lima. **Análise de Desempenho da Flotação Por Ar Dissolvido no Adensamento do lodo de ETA**. 2021. 87 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2022.

Existem diversas formas de se fazer tratamento de água. A técnica de Dupla Filtração utilizadas nas estações de tratamento de água é uma das mais promissoras, porém mesmo a melhor técnica pode ser melhorada. Pensando nisso para analisar uma das formas de limpeza do lodo de ETA (LETA) visando melhor eficiência e diminuindo custos direcionando, dessa forma, as ações para uma gestão mais sustentável do lodo, foi feito um estudo do comportamento do adensamento. Ele se destaca por oferecer, na ETA, uma opção de aumento da concentração de sólidos e redução do volume de água do lodo, otimizando a eficiência dos equipamentos de desaguamento. Esse trabalho usa o método Por Ar Dissolvido (FAD) para a implantação de melhorias na gestão do lodo gerado nas estações de tratamento de água. Pensando nisso essa pesquisa estudou o comportamento de 3 tipos de polímeros sendo eles: catiônico, não-iônico e aniônico e os comparou com os ensaios sem o uso de polímeros. Para obter dados estatisticamente confiáveis foi utilizado a metodologia estatística de RSM. Obteve então a caracterização do LETA e foram feitos os ensaios de bancadas para obter os dados dos parâmetros de análise da Turbidez do Sobrenadante e as Velocidades de Clarificação e Sedimentação. A água de estudo apresentou alcalinidade de 55mgCaCo₃/L, turbidez de 95,1 NTU e Ferro de 6,28 mg Fe/L. A RSM não se mostrou eficiente pois resultados foram ruins do ponto de vista estatístico, apenas o polímero não-iônico teve relevância estatística no ensaio da Turbidez do sobrenadante, com tempo de ensaio considerado o mesmo comparado ao sem o uso de polímero. Enquanto nas velocidades estudadas apenas o polímero catiônico teve resultado estatístico relevante, com o tempo de ensaio 42,9% menor em relação ao sem uso de polímero. Com relação ao âmbito regional esse presente estudo foi pioneiro nos trabalhos com aplicação da FAD em uma ETA local e do tipo Dupla Filtração, pois existem poucas pesquisas com aplicação dessa técnica em unidades desse modelo.

Palavras-chave: RSM, Lodo de ETA, Polímeros, Dupla Filtração.

ABSTRACT

SILVA, Pedro Filipe Lima. **Performance Analysis of Dissolved Air Flotation in ETA Sludge Densification**. 2021. 87p. Completion of course work - Bachelor's degree in Civil Engineering - Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins. Palmas, 2022.

There are several ways to treat water. The Double Filtration technique used in water treatment plants is one of the most promising, but even the best technique can be improved. With this in mind, in order to analyze one of the ways of cleaning the WTP sludge (LETA) aiming at better efficiency and reducing costs, thus directing actions towards a more sustainable management of the sludge, a study of the behavior of the densification was carried out. It stands out for offering, at the WTP, an option to increase the concentration of solids and reduce the volume of sludge water, optimizing the efficiency of dewatering equipment. This work uses the Dissolved Air (FAD) method to implement improvements in the management of sludge generated in water treatment plants. With that in mind, this research studied the behavior of 3 types of polymers, namely: cationic, non-ionic and anionic, and compared them with tests without the use of polymers. To obtain statistically reliable data, the statistical methodology of RSM was used. Then, the characterization of the LETA was obtained and bench tests were carried out to obtain data on the analysis parameters of the Turbidity of the Supernatant and the Clarification and Sedimentation Speeds. The study water presented alkalinity of 55mgCaCo3/L, turbidity of 95.1 NTU and Iron of 6.28 mg Fe/L. The RSM was not efficient because the results were poor from the statistical point of view, only the non-ionic polymer had statistical relevance in the Turbidity test of the supernatant, with the test time considered the same compared to without the use of polymer. While at the speeds studied, only the cationic polymer had a relevant statistical result, with the test time 42.9% shorter in relation to the one without the use of polymer. Regarding the regional scope, this study was a pioneer in the work with the application of FAD in a local WTP and of the Double Filtration type, as there are few researches with the application of this technique in units of this model.

Keywords: RSM, ETA Sludge, Polymers, Double Filtration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema ilustrativo da distribuição da água no lodo.....	24
Figura 2: Fluxograma do Tratamento por Dupla Filtração.....	26
Figura 3 Representação esquemática dos Polímeros Aniônicos, Não Iônicos e Catiônicos	28
Figura 4: Relação entre pH e dosagem de coagulantes entre os Polímeros	29
Figura 5: Fluxograma da Pesquisa Proposta	31
Figura 6: Filtros FAP e FAD - ETA Dupla Filtração	32
Figura 7: Procedimento de Coleta das Amostras.....	35
Figura 8 Esquemático dos Ensaios de Adensamento de FAD.....	39
Figura 9: Etapas dos Ensaios de Adensamento por FAD.....	41
Figura 10: Amostra Composta - Água de Estudo.....	45
Figura 11: Adensamento por FAD - Turbidez Remanescente no LETA	46
Figura 12: Superfícies de resposta da Turbidez Remanescente - Adensamento por FAD.....	49
Figura 13: Comparação da Turbidez – sem polímero x com polímero	49
Figura 14: Superfícies de resposta da VCl e Vsd – Polímero Catiônico.....	54
Figura 15: Curvas de Adensamento por FAD - Polímero Catiônico.....	56
Figura 16: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por FAD com Polímero Catiônico	66
Figura 17: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por FAD com Polímero Catiônico	68
Figura 18: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Sedimentação no Adensamento por FAD com Polímero Catiônico	70
Figura 19: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Turbidez do Sobrenadante no Adensamento por FAD com Polímero Aniônico	72
Figura 20: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por FAD com Polímero Aniônico.....	74
Figura 21: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Sedimentação no Adensamento por FAD com Polímero Aniônico	76
Figura 22: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Turbidez do Sobrenadante no Adensamento por FAD com Polímero Não-Iônico.....	78

Figura 23: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por FAD com Polímero Não-Iônico	80
Figura 24: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Sedimentação no Adensamento por FAD com Polímero Não-Iônico.....	82
Figura 25: Curva de Adensamento por FAD: Polímero Aniônico	84
Figura 26: Curva de Adensamento por FAD: Polímero Não-Iônico.....	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Equipamentos de Ensaio	33
Quadro 2: Características dos Polímeros.....	36
Quadro 3: DCCR – Entrada de variáveis Qualitativas e Quantitativas	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros, Métodos e Limites de Detecção segundo APHA (2017).....	34
Tabela 2: Procedimento de Coleta de Amostras.....	34
Tabela 3: Variáveis de análise para o Adensamento por FAD.....	37
Tabela 4: Planejamento Experimental - Adensamento por FAD	38
Tabela 5: Caracterização físico-química da Água de Estudo	43
Tabela 6: Turbidez do Sobrenadante - DCCR do Adensamento por FAD	47
Tabela 7: Análise p-valor da Turbidez - Adensamento	48
Tabela 8: VCl e Vsd - DCCR Adensamento por FAD.....	50
Tabela 9: Velocidades de Clarificação e Sedimentação - Análise p-valor.....	52
Tabela 10: Dimensionamento das unidades de adensamento.....	57
Tabela 11: Resultados da Regressão da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Catiônico – Adensamento por FAD.....	65
Tabela 12: Análise de Variância da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Catiônico – Adensamento por FAD.....	65
Tabela 13: Resultados da Regressão da Velocidade de Clarificação com Polímero Catiônico – Adensamento por FAD.....	67
Tabela 14: Análise de Variância da Velocidade de Clarificação com Polímero Catiônico – Adensamento por FAD.....	67
Tabela 15: Resultados da Regressão da Velocidade de Sedimentação com Polímero Catiônico – Adensamento por FAD.....	69
Tabela 16: Análise de Variância da Velocidade de Sedimentação com Polímero Catiônico – Adensamento por FAD.....	69
Tabela 17: Resultados da Regressão da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Aniônico – Adensamento por FAD.....	71
Tabela 18: Análise de Variância da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Aniônico – Adensamento por FAD.....	71
Tabela 19: Resultados da Regressão da Velocidade de Clarificação com Polímero Aniônico – Adensamento por FAD.....	73
Tabela 20: Análise de Variância da Velocidade de Clarificação com Polímero Aniônico – Adensamento por FAD.....	73

Tabela 21: Resultados da Regressão da Velocidade de Sedimentação com Polímero Aniônico – Adensamento por FAD.....	75
Tabela 22: Análise de Variância da Velocidade de Sedimentação com Polímero Aniônico – Adensamento por FAD.....	75
Tabela 23: Resultados da Regressão da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Não-Iônico – Adensamento por FAD.....	77
Tabela 24: Análise de Variância da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Não-Iônico – Adensamento por FAD.....	77
Tabela 25: Resultados da Regressão da Velocidade de Clarificação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por FAD.....	79
Tabela 26: Análise de Variância da Velocidade de Clarificação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por FAD.....	79
Tabela 27: Resultados da Regressão da Velocidade de Sedimentação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por FAD.....	81
Tabela 28: Análise de Variância da Velocidade de Sedimentação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por FAD.....	81

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações

ANOVA	Análise de Variância
APHA	<i>American Public Health Association</i>
AWWA	<i>American Water Works Association</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
COT	Carbono Orgânico Total
DAF	<i>Dissolved Air Flotation</i>
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Efluente
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
IHSS	<i>International Humic Substances Society</i>
LETA	Lodo de Estação de Tratamento de Água
MON	Matéria Orgânica Natural
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
SHA	Substâncias Húmicas Aquáticas
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SST	Sólidos Suspensos Totais
T _{sd}	Turbidez do sobrenadante
TR	Taxa de Recirculação de Água
TSólidos	Teor de Sólidos
UFT	Universidade Federal do Tocantins
UGL	Unidade Geradora de Lodo
V _{cl}	Velocidade de Clarificação

V_{sd}	Velocidade de Sedimentação/Adensamento
V_{Lodo}	Volume de Lodo
μT	Unidade de Turbidez
WTP	<i>Water Treatment Plant</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. PROBLEMA DE PESQUISA.....	19
3. JUSTIFICATIVA	20
4. OBJETIVOS.....	21
4.1 Objetivo Geral	21
4.2 Objetivo Específicos	21
5. REVISÃO DE LITERATURA	22
5.1 Resíduos de ETAs	22
5.1.1 Origem dos resíduos	22
5.1.2 Estudos Qualitativos dos sólidos do LETA	23
5.2 ETAs de Dupla Filtração	25
5.3 Flotação por Ar Dissolvido	26
5.4 Polímeros 27	
5.4.1 Polímeros Catiônicos	28
5.4.2 Polímeros Aniônicos	29
5.4.3 Polímeros Não Iônicos.....	29
6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	31
6.1 Área de Estudo.....	32
6.2 Equipamentos e Métodos de Análise	32
6.2.1 Características da Água de Estudada.....	33
6.2.2 Processo Para a Coleta das Amostras	34
6.3 Polímeros 35	
6.4 Ensaios de Bancada	36
6.4.1 Planejamento de Experimentos	36
6.4.2 Ensaio de Adensamento Por FAD	38

6.4.3 Análise de Dados	41
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
7.1 Água de estudo	43
7.2 Ensaios No Laboratório	45
7.2.1 Turbidez do Sobrenadante	45
7.2.2 Velocidade de Clarificação (Vcl) e Sedimentação (Vsd) no adensamento FAD	50
7.3 Pré-Dimensionamento das unidades.....	57
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS	59
APÊNDICE A	64
APÊNDICE B.....	83

1. INTRODUÇÃO

Na intenção de reduzir a quantidade de sólidos presentes nos filtros de ETAs, as técnicas de adensamentos podem oferecer melhorias no controle do lodo gerado no processo de tratamento. Para que essa Limpeza seja feita de forma eficaz é necessário garantir que os filtros estejam sempre limpos. Para garantir o desempenho desses Filtros há a necessidade de se estudar e fazer diversos testes laboratoriais que informam qual forma mais barata e rápida de limpar o lodo presente nesses Filtros.

A evolução na gestão e formas eficaz de tratamento de água no Brasil tem sido pouca, com mudanças de técnicas já consideradas arcaicas na década de 90, técnicas essas que eram seguidas à risca por meio de normas que tinham maiores intenções de padronização na forma de fazer tratamento de água, onde a finalidade maior era a de que fiscais de saneamento a executassem (LUSTOSA *et al*, 2016). O estudo de tratamento de água então vem se tornando cada vez mais importante, visto que em muitas das situações podem ser descobertas maneiras mais baratas de se limpar água.

O lodo de ETA (LETA), de acordo com Cordeiro (1999) e Guimarães (2007), são considerados uns dos principais responsáveis por impactos ambientais, no lodo pode ter diversos materiais que dependem da quantidade e qualidade da água bruta, pela capacidade da ETA e os produtos químicos usados, dessa forma se torna um desafio estudar maneiras mais baratas e eficaz para trata-lo nos filtros.

Das técnicas de tratamento de água que existem as duas mais utilizadas são Ciclo Completo e Dupla Filtração. As duas juntas preenchem cerca de 50% das estações de tratamento de água ativas no Brasil (SENS *et al*, 2009). Já para as estações do tipo Dupla Filtração os lodos gerados por elas são caracterizados pela filtração direta ascendente e descendente, tendo a sua produção de lodo restrita às lavagens e descargas de fundo dos filtros (DI BERNARDO *et al*, 2002).

De acordo com dados do SNIS Brasil (2020), as ETAs no Brasil tratam o equivalente a $13,4 \times 10^9$ m³ de água dos quais apenas 0,42% (ou $56,3 \times 10^6$ m³) é produzido no Tocantins. Desses, 32% são ETAs Não-Convencionais conforme PNSB IBGE (2021), com esses dados é estimado que no Estado do Tocantins as unidades em operação podem alcançar uma produção de lodo de $1,44 \times 10^6$ ton/ano.

Conforme estabelece Katayama (2012), uma parte do lodo gerado nas estações de tratamento de água (ETAs) no Brasil é disposto em rios ou em aterros sanitários. Com esses dados a confirmação do autor se torna algo preocupante para as companhias operacionais, pois existe uma pressão dos agentes reguladores por meio de leis e instruções normativas para uma gestão mais sustentável do lodo.

Para isso existe um desafio não só para redução de custos, mas para que as empresas de fato possam fazer tratamentos adequados, pois com o intuito de diminuir custos muitas vezes as empresas fazem tratamento de água mal feito e a fiscalização com o uso de normas e leis procuram medidas para que esse cenário não ocorra. Com base neste cenário, se destacam ações que otimizam os processos de tratamento, como a redução do volume de lodo produzido e a adoção de novas estratégias para disposição do lodo gerado nos processos de tratamento.

Buscar a melhor produção de água potável e a redução das perdas de processo é o ponto chave dessa pesquisa. Dessa forma reduzir o volume de lodo gerado no tratamento a medida em que se aumenta a quantidade de água produzida. Cordeiro (1999) complementa a importância na redução do volume do LETA na produção de água, para diminuir os custos operacionais ligados ao transporte e disposição dos resíduos. Já que para Cordeiro (2001), 95% do lodo é constituído por água em excesso.

Di Bernardo e Paz (2008) e Ferreira Filho (2017) destacam que os principais métodos de adensamento utilizados são o Adensamento Mecanizado, a Sedimentação, a Flotação por Ar Dissolvido (FAD), sendo o último o utilizado para estudo na presente pesquisa. Por se trata de uma técnica pouco difundida no Brasil, seu estudo é de total importância para tomada de decisões de qual método usar no planejamento de criação de futuras ETAs de Dupla Filtração.

Tendo em vista que a eficiência dos processos de adensamento é determinada pelas características operacionais da planta, da água bruta captada, e da tecnologia de adensamento empregada, foi feito o questionamento para pautar este estudo: *Qual a influência do tipo de condicionamento e da qualidade da água bruta para definição do método de adensamento de Flotação Por Ar Dissolvido como opção no tratamento do lodo de uma ETA de Dupla Filtração?*

Portanto o desafio dessa pesquisa é procurar maneiras eficaz e, dessa forma, mais barata possível para tratamento do LETA por meio da Flotação por ar dissolvido (FAD) com o uso de três tipos diferentes de polímeros, sendo eles: catiônicos, aniônicos e não-iônicos. E compara

os dados obtidos entre eles a partir de um modelo matemático que mostra o nível de confiança estatístico dos resultados obtidos.

2. PROBLEMA DE PESQUISA

O método de adensamento de Flotação por Ar Dissolvido é uma técnica pouco usada para limpeza do LETA em estações de tratamento de água do tipo Dupla Filtração. Um dos fatores que pode ser considerados como de grande influência para essa realidade é a falta de estudos relacionados a esse método de adensamento para limpeza dos lodos presentes nas estações de tratamento. Portanto alguns questionamentos são levantados, como: o seu uso pode ser bem-vindo? Em quais circunstâncias ele pode ser ideal?

Pensando nesses pontos a pergunta chave dessa pesquisa é, qual a aplicação do polímero ideal e sua dosagem para a limpeza de LETAs através do uso da técnica de Flotação por Ar Dissolvido em ETAs de Dupla Filtração?

3. JUSTIFICATIVA

A deficiência de estudos pertinentes ao uso de Flotação por Ar dissolvido em ETAs de Dupla Filtração é muito grande. A necessidade desse trabalho é muito importante visto o fato de análises de estudo de instalação de futuras ETAs procurando o melhor desempenho, custo benefício e por fim o que garantirá boas qualidades de água para abastecimento da população em geral.

Portanto, devido ao crescimento populacional a demanda de água tratada é maior e a quantidade de lodo produzidos por essas estações também é maior, daí ser necessário o uso de pesquisas que mostram maior velocidade na clarificação desse LETA, para assim os filtros poderem ser usados novamente o quanto antes e por fim melhorando o desempenho de uma mesma ETA que antes tinha mais gastos com químicos e menor velocidade de tratamento de água.

Para além dessa contribuição essa pesquisa vai agregar em muitos estudos futuros, pois pode servir de parâmetro e comparação para se estabelecer mais confiança sobre os resultados ou gerar mais indagação, levando a mais novos estudos até que se estabeleça uma confiança no processo metodológico e por fim na garantia de estabilidade ao se levar em consideração a aplicação desse método em estações de tratamento de água.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho de três polímeros diferentes e suas quantidades diluídas no lodo de ETA de Dupla Filtração em ensaios com método de Flotação por ar dissolvido (FAD) e a comparação do seu desempenho com o ensaio sem uso de polímero.

4.2 Objetivo Específicos

- Avaliar a turbidez do sobrenadante da água nos ensaios para cada dosagem usada dos polímeros e sem o uso deles;
- Verificar a influência das características qualitativas da água no adensamento por Flotação por Ar Dissolvido;
- Analisar o comportamento e eficiência de cada tipo de polímero usado durante o processo dos ensaios;

5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Resíduos de ETAs

5.1.1 Origem dos resíduos

O LETA é um produto do material residual do filtro, feito a partir do tratamento inicial da água bruta com o uso de coagulantes ou abrandadores caso aja a necessidade de limpeza de íons como cálcio e magnésio que são responsáveis pela dureza da água. Dependendo dos químicos utilizados no processo da limpeza da água bruta, a composição orgânicas e inorgânicas da água recebida para o tratamento que juntos caracterizam a cor e a turbidez desse material, a quantidade de tempo que esse lodo fica no tanque e a eficiência da sedimentação são os principais formadores desse produto.

Alguns autores destacam outras influências no LETA, que dependendo da estação do ano o manancial pode exigir mais da ETA para tratar a água bruta e, portanto, isso acaba influenciando nos compostos presentes no LETA no meio do tratamento de água Cordeiro (1999), Fontana (2004) destaca ainda que a limpeza dos decantadores também influenciam no resultado final do LETA.

Independentemente da quantidade de água tratada o que define o lodo da ETA é a quantidade do volume e massa dos sólidos produzidos sendo proveniente da bacia. Esses sólidos são submetidos ao processo de definição de flocos dos quais são formados a partir do processo de sedimentação ou flotação (CORDEIRO, 2001).

Quaisquer que sejam a tecnologia e método utilizado para o tratamento da água bruta o resultado no final será sempre o mesmo: água tratada e lodo. Essa água pode se caracterizar pelo tipo de solo, o local, a maneira de utiliza-la no manancial e também pelo incremento de químicos desde os básicos para auxiliar no processo de adensamento até os reguladores de pH, com uso de coagulantes, que dessa forma contribuem para o tipo de lodo final da ETA.

Os LETAs, podem ser divididos em quatro categorias de acordo com (ASCE; AWWA; EPA, 1996 apud FERREIRA FILHO, 2017):

1 –LETAs de origem no processo de tratamento da água bruta que estão presentes em decantadores e filtros;

2 – LETAs de sólidos que surgem durante o processo de remoção da dureza da água;

3 – LETAs que são gerados por processos não comuns para maior limpeza da água bruta, com uso de carvão ativado ou arraste de ar

4 – LETAs líquidos com menor concentração de químicos que são obtidos através de processos como: osmose reversa, ultrafiltração e entre outros)

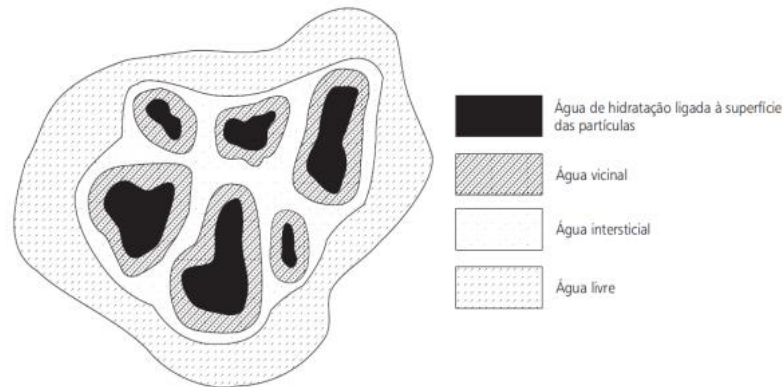
A partir do processo de coagulação cerca de 60 a 95% do lodo gerado é retido no adensamento, enquanto a outra parte vai para o filtro (RICHTER, 2001). Segundo Braga et al (2007) cerca de 2 a 10% da água completamente tratada de uma ETA é utilizada para limpeza dos filtros. A concentração dos sólidos de lodo após a lavagem dos filtros é de 0,004 a 0,1% segundo (RICHTER, 2001). Sendo assim o maior volume de resíduo líquido gerado por uma ETA é gerado pela lavagem de filtros.

5.1.2 Estudos Qualitativos dos sólidos do LETA

Conforme consta na NBR 10.004 ABNT (2004) o LETA é composto em sua maior parte de líquido, e considerado como um resíduo de Classe II – não inerte. Apesar disso, na prática, essa informação tem variações e isso interfere diretamente na dificuldade de separação das fases.

De acordo com Di Bernardo e Paz (2008), a água do Lodo é composta por 4 fases, sendo a fase 1, a água livre onde está totalmente desassociada de partículas sólidas, já fase 2 é composto de água Intersticial ou capilar tendo uma ligação mecânica ao sólido, a fase 3 é a de água vicinal nessa camada as partículas de água estão aderidas aos sólidos através de pontes de hidrogênio e por fim na fase 4, água de hidratação, a água está ligada ao sólido quimicamente. A Figura 1 abaixo mostra o Esquema dessas 4 fases.

Figura 1: Esquema ilustrativo da distribuição da água no lodo



Fonte: Di Bernardo e Paz (2008)

As camadas Intersticial e Vicinal são as mais difíceis de serem tratadas, precisando do uso de polímeros para ser tratada. A quantidade de cada uma dessas fases é quem determina a dificuldade para tratar a água durante o adensamento e desidratação.

5.1.2.1 Parâmetros físicos

Os estudos das características físicas do lodo envolvem a concentração de sólidos, cor, turbidez, resistência específica, tamanhos, capacidade de sedimentação, distribuição, viscosidade e densidade. Para esse trabalho o de maior relevância é a resistência específica, os dados desse parâmetro indicam que quanto menor mais facilmente a partícula se solta da água.

Segundo Grandin (1992) a resistência específica do lodo no processo dos decantadores da ETA está entre 5 e 70.1012 mg/kg, enquanto na água de lavagem para os filtros está na faixa de 0,1 a 15.10² mg/kg. Isso se deve ao fato do uso de polímeros que condicionam um melhor desempenho de desidratação.

5.1.2.2 Parâmetros Químicos

As características químicas do LETA são de extrema importância na definição do tipo de método para disposição final e no reaproveitamento do resíduo (CARVALHO, 2000). Os parâmetros químicos são identificados através do pH, DBO, DQO, concentração de metais pesados, nitrogênio, fósforo, fármacos, venenos, entre outros.

Até 92% dos químicos que são comumente utilizados durante o tratamento da água podem ser contidos durante a passagem para o lodo, a depender do processo de fabricação (CARVALHO, 2000). Os principais componentes dos LETAs são hidróxido e óxido de ferro e alumínio, argilas silicatadas, matéria orgânica e contaminantes. Os metais do LETA desenvolvem efeitos tóxicos que causam danos a natureza se não forem feitos métodos adequados de disposição final ou reutilização (PEREIRA S., 2011).

O tipo de coagulante usado durante o tratamento da água define o comportamento do lodo. LETAs a base de hidróxido de ferro ou alumínio se ligam com mais facilidade a matéria orgânica (RICHTER, 2001). O Sulfato de Alumínio tem característica de lodo com cor marrom viscoso e com grande consistência (REALI, 1999). Já a água tratada com sais de ferro apresenta um lodo com tom marrom-avermelhado.

5.1.2.3 Parâmetros Microbiológicos

São divididas em dois principais grupos: matéria orgânica e agentes patogênicos. Para os agentes patogênicos é importante ter uma análise da água da ETA, pois alguns são nocivos ao ser humano, apesar de não ser comum ver, a sua identificação é feita através da identificação de coliformes. Quanto a matéria orgânica os números são maiores variando de 5 a 25%, dependendo do solo (ANDREOLI et al, 2006). Com o uso de coagulantes como AL e Fe a concentração de orgânicos no LETA costuma ser maior do que a do solo em que foi retirada a água.

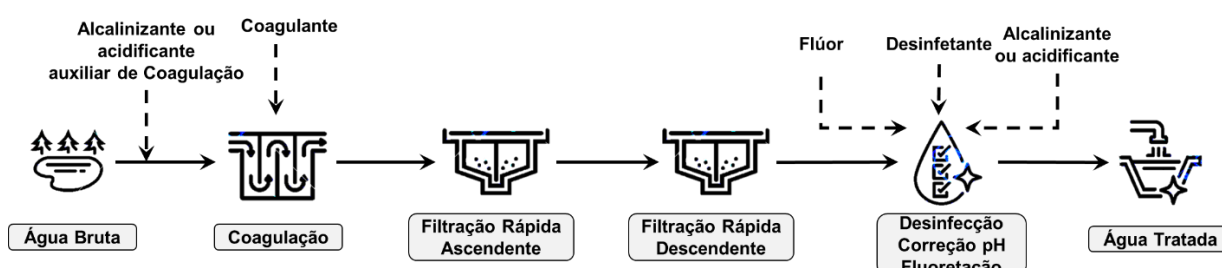
5.2 ETAs de Dupla Filtração

No cenário nacional, embora tenha poucas quantidades de ETAs não-convencionais, estas unidades tratam um volume grande em relação ao total de água produzida. Cerca de 80% da água do Tocantins é tratada através do método de Dupla Filtração (DI BERNARDO L., 2003). Essa tecnologia era utilizada pelo motivo de que antigamente, quando a água era muito contaminada e não existiam tecnologia para ser tratada de forma eficiente na Filtração direta. Além disso ela tem outras vantagens com relação a filtração direta, como por exemplo, elevado vazão para tratamento, mais segurança conforme variação da vazão de água bruta, elevada remoção de microrganismos, a depender da quantidade de e não precisa do descarte de efluente do filtro ascendente no início da carreira de filtro.

O processo de tratamento de água do filtro de dupla filtração começa com o uso do coagulante na água bruta recém-chegada na estação, então essa água é jogada para a parte inferior do filtro ascendente, após esse processo e pré-filtrada a água é levada para o filtro descendente e por fim recebem produtos químicos que agem para eliminar quaisquer microrganismos que ainda estejam vivos na água.

A Figura 2 abaixo apresenta um fluxograma com o esquema do processo de Dupla Filtração. É mostrado nele, 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 Flotação por Ar Dissolvido

É um tipo de método no qual os sólidos são aglomerados em bolhas de ar que por sua vez são suspensos e separados em sua maioria da água, ao se misturar com as partículas a densidade dela fica menor do que a água o que faz com que o aglomerado suba para superfície da água. A Flotação Por Ar Dissolvido é bastante usada para substituir a sedimentação em águas onde existe uma elevada taxa de microrganismos como algas e baixa turbidez, alcalinidade ou cor (COUTINHO, 2007).

A Flotação Por Ar Dissolvido é uma boa opção de adensamento para águas onde a concentração de sólidos suspensos totais (SST) são baixos ou baixo hidróxido metálico, (BOURGEOIS, WALSH e GAGNON, 2004). Os autores destacam ainda que a eficácia do FAD é considerável quando se faz o uso de coagulantes, ainda mais em casos onde a oxigenação da água é alta onde o desempenho é ainda maior que em sedimentação.

Realí e Patrizzi (1999) destacam que os parâmetros mais importantes para se estabelecer a eficiência da FAD são o de tempo de detenção, velocidade longitudinal, a taxa hidráulica de

aplicação superficial e a relação Ar/Sólidos (A/S). Dentre esses o que destaca ultimo ainda se destaca por ser o que estabelece a quantidade de microbolhas que estão associadas ao lodo em relação ao SST da água.

Chaves (2012) realizou uma pesquisa onde analisou a qualidade de clarificação da água para lavar os filtros da FAD com o uso de polímeros. Nela, mostrou-se que a FAD é um excelente método para remoção de cor, alumínio, coliformes e turbidez, mesmo em situações em que os sólidos variavam na água durante o processo de lavagem dos filtros. No final a água apresentava boas condições para ser despejada no corpo hídrico, conforme a legislação.

A FAD, como qualquer outro procedimento e técnica, tem seus defeitos, Schofield (1997 apud GUIMARÃES, 2007) destaca que a dificuldade de estabilização das microbolhas aglomeradas no LETA durante o processo de flotação. De acordo com Ferreira Filho (1997) o uso da FAD em mananciais eutrofizados pode ter desempenho ruim, acabando por dificultar na separação do LETA da água bruta.

5.4 Polímeros

Os polímeros são moléculas hidrossolúveis e orgânicas com cadeia molecular longa. É um tipo de coagulante e considerado como uns dos principais para o uso no tratamento de água, eles se destacam pelo elevado desempenho e melhoria na velocidade do tratamento da água independente do uso, sendo ele coagulação, floculação ou filtração (DI BERNARDO E PAZ, 2008).

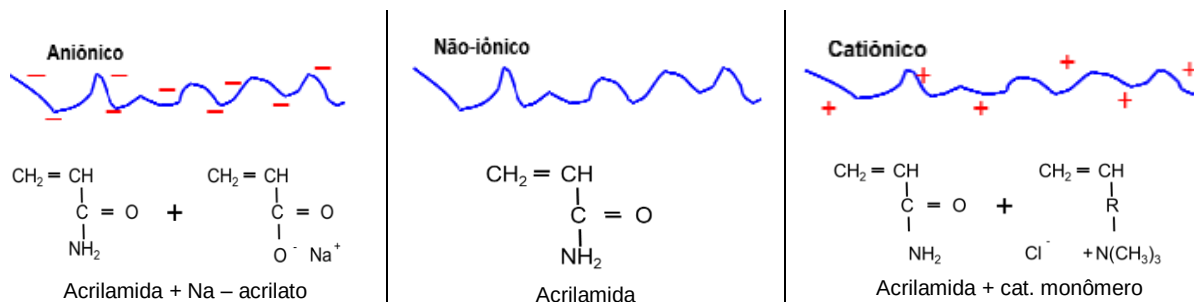
Ele tem a função de aumentar e junta as partículas do LODO, independente se for para neutralizar-adsorção das cargas, pela combinação destes mecanismos, ou pela formação de pontes (LOVO, 2016).

Os polímeros podem ter origem variadas, sendo ela de origem natural como no amido ou sintético, tendo classificação também de acordo com seu peso molecular (baixo, médio, alto, muito alto) ou ainda de acordo com sua carga elétrica (baixa, média e alta). Dependendo do meio eles podem ser classificados como catiônicos, aniônicos e não-iônicos.

O desempenho do polímero é determinado conforme sua carga, a dosagem a ser usada o tempo de mistura e o gradiente de velocidade (HAAK, 2011). Geralmente quanto maior o peso molecular e a carga do polímero melhor seu desempenho conforme destaca o autor.

A Figura 3 mostra o esquema da constituição da cadeia do polímero para poder compreender melhor a formação destas moléculas através do comportamento dos íons e composição.

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



Fonte: Adaptado de Haak (2011)

5.4.1 Polímeros Catiônicos

Os polímeros cationicos são amidos carregados positivamente ($-NH_3^+$), amino (CH_3- , NH_2^+ , CH_2-) ou o amino quaternário (NR_4) de acordo com (SARTORI, 1998). De acordo com Kremmer (1987), esse polímero tem desempenho maior quando usado em floculação podendo, portanto, ser usado como tipo de coagulante primário, devido ao mecanismo de adsorção e neutralização de cargas. Ainda para Landim (2005) diferentes de polímeros com carga negativas ou neutras, esse polímero sem a adição de coagulantes pelo motivo de ter carga positiva e consequentemente diminuir o potencial zeta, facilitando a floculação.

A redução do potencial zeta ocorre com a entrada dos cátions na superfície eletrocinética da partícula. Então as forças de repulsão entre as partículas tende a ter um resultado zero e elas são unidas pelas forças de Van der Waals. Esses efeitos têm mais eficiência na presença de íons metálicos (HOSOKAWA *et al*, 1999).

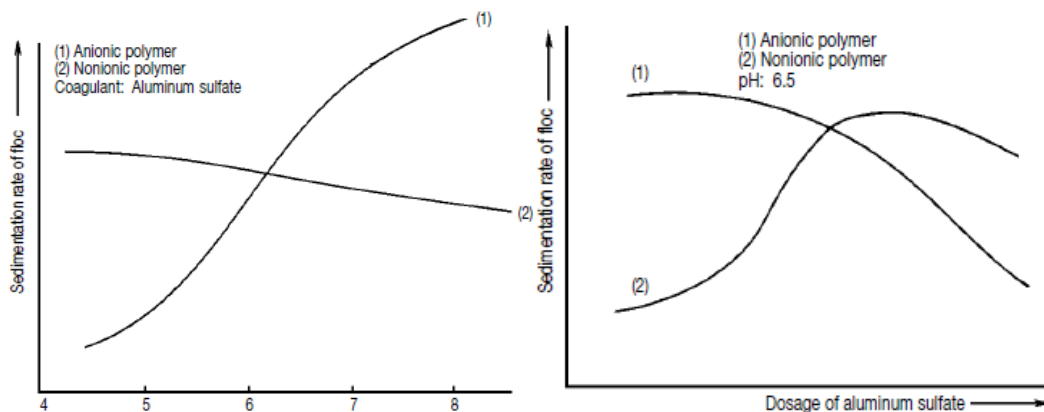
Di Bernardo A. *et al* (2000) relata que os polímeros cationicos podem ser criados para fins usuais por meio da co-polimerização de acrilamida com um monômero cationico, tendo como resultado polímeros de massa molecular considerada alta. Mas o uso dele deve ser feito com bastante atenção devido à toxicidade que ele pode dar à água tratada por ter como consequência o resíduo dele durante o processo de aplicação.

5.4.2 Polímeros Aniônicos

Já os polímeros aniônicos têm seu uso com floculante quando são de cadeias moleculares mais pesadas ou dispersantes quando peso menor. De acordo com Hosokawa (1999) os grupos funcionais são carboxílicos (-COOH) e amidas (-CONH₂). Quanto a floculação esse polímero tem mesmo comportamento que os catiônicos. A dispersão desse polímero ocorre por meio da adsorção dos SST na superfície e a repulsão das moléculas, a partir da transferência elétrons para os sólidos que estão no meio aquoso (KREMMER, 1987).

Esses polímeros possuem melhor desempenho em meio aquoso onde o pH é básico e também em meios com baixo teor de coagulantes. Em soluções com pH mais alto, portanto, alcalino há a dissociação dos grupos carboxílicos e expansão do volume dos polímeros. Já em concentrações baixas de coagulantes há a adsorção dos flocos pelos grupos carboxílicos que é responsável por parte do processo de floculação (HOSOKAWA *et al*, 1999). A densidade da carga dos polímeros não-iônicos e aniônicos tem tendência a variar conforme o pH e a dosagem deles no meio aquoso, esse comportamento pode ser observado na Figura 4.

Figura 4: Relação entre pH e dosagem de coagulantes entre os Polímeros



Fonte: Hosokawa *et al* (1999)

5.4.3 Polímeros Não Iônicos

Os polímeros não iônicos são compostos sem carga iônicas, ou seja, neutros e tem características similares aos com cargas no meio aquoso para floculação conforme esclarece (KREMMER, 1987). Suas formações de flocos ocorrem por meio de ligação de hidrogênio

conforme destaca (LANDIM, 2005). O pH não tem tanta influência para o seu comportamento diferente dos polímeros carregados positivamente ou negativamente.

Kremmer (1987) faz uma análise dos polímeros não iônicos com peso molecular considerado alto em alguns sistemas. O Autor destaca que por causa da capacidade desse polímero em atrair e segurar partículas coloidais nos polos, ele tem uma utilidade boa no uso de partículas pequenos por conseguir ligar partículas diferentes na mesma molécula.

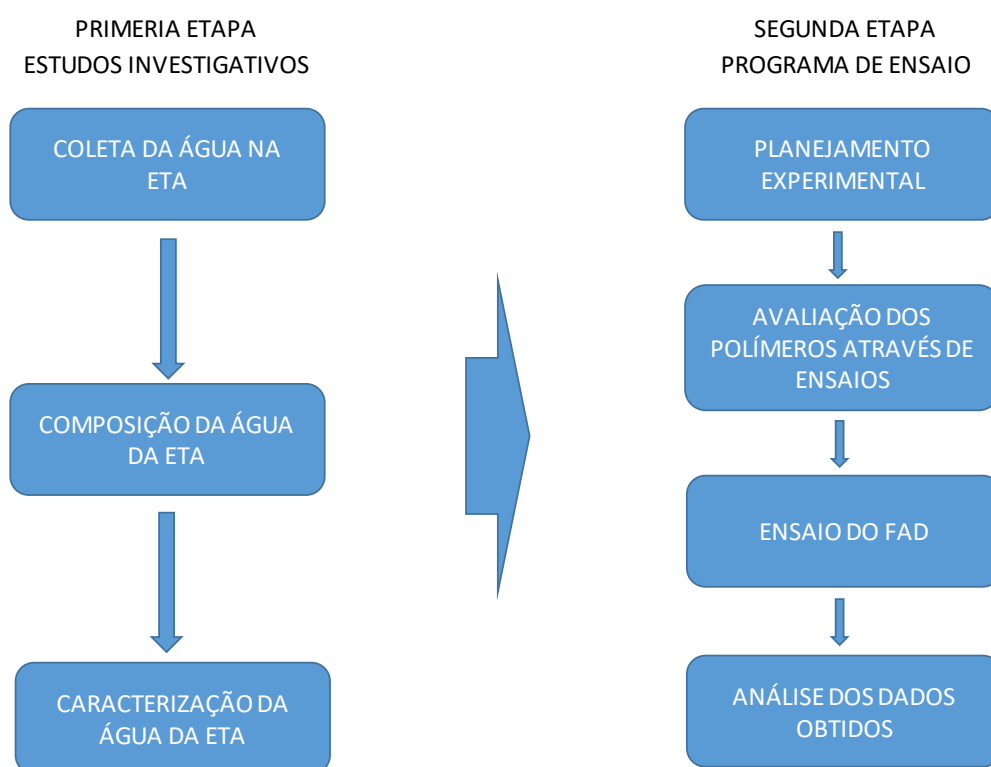
6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia do trabalho foi dividida em duas etapas a primeira, estudos investigativos, consiste em estudos das literaturas acerca dos princípios da formação do lodo e sua caracterização, bem como a identificação de tecnologias sobre a FAD. Correlacionando o processo da ETA de forma a ficar adequado com os processos de flotação. O estudo da literatura foi de suma importância para a interpretação dos resultados obtidos.

A segunda, fase de programa de ensaios são as de definições das dosagens para o condicionamento dos LETAs de Dupla Filtração, através de experimentações. Foram avaliados, através de procedimentos laboratoriais os parâmetros de desempenho no processo de adensamento por FAD com a utilização de ensaios de bancada.

O Fluxograma da Figura 5 a seguir demonstra de forma mais objetiva a organização de como percorreu a pesquisa:

Figura 5: Fluxograma da Pesquisa Proposta



Fonte: Autor (2021)

6.1 Área de Estudo

O LETA desse trabalho foi retirado na ETA-001 da BRK no distrito de Luzimangues, pertencente a cidade de Porto Nacional – TO. A água é das margens do Lago do rio Tocantins na Usina Hidrelétrica Luiz Eduardo Magalhães (UHE Lajeado), onde a captação é feita através de um conjunto de motor bomba. A água é captada e levada para a estação de tratamento a 5km por meio da rede adutora.

A ETA em questão é de Dupla Filtração, pelo fato da condição da água formada por um Filtro Ascendente com Pedregulho (FAP) seguido de um Filtro Rápido Descendente (FRD). No início do seu tratamento é aplicado coagulante no montante da carga da água bruta, seguindo então para o FAP e depois para o FRD, e pôr fim a água é submetida ao processo de fluoretação e desinfecção.

O LETA em questão (Figura 6) é originado a partir do descarte do fundo do FAP.

Figura 6: Filtros FAP e FAD - ETA Dupla Filtração



Fonte: Autor (2021)

6.2 Equipamentos e Métodos de Análise

Os ensaios de bancada no laboratório de águas do IFTO campus Palmas TO seguiram a metodologia estabelecida no “Standard Methods for Examination of Water nad Wastewater”

de edição 23 APHA (2017). Já as caracterizações foram estabelecidas pelo Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP, em Ribeirão Preto – SP.

Segue no Quadro 1 os equipamentos e parâmetros de interesse:

Quadro 1: Equipamentos de Ensaio

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

Fonte: Autor (2021)

6.2.1 Características da Água de Estudada

A água do LETA foi obtido a partir da mistura da lavagem dos dois filtros FAP e FRD e da descarga do fundo deles, a amostra tem então a quantidade de lodo proporcional a gerada pela lavagem dos filtros. Para uma definição precisa das amostras, elas foram coletadas separadamente para a realização da caracterização físico-química, obtendo assim a turbidez, quantidade de sólidos, pH, alcalinidade e afins.

Já que a qualidade do LETA depende diretamente da qualidade de tratamento realizado na ETA e da qualidade da água bruta prevista foram feitas análises físico-químicas da água bruta e do lodo do processo de tratamento.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seguir demonstra os parâmetros físico-químicos avaliados em cada uma das amostras:

Tabela 1: 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
Manganês	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 Processo Para a Coleta das Amostras

A coleta do LETA foi feita a partir da carreira de maior duração da filtração (FAP), ou seja, 72h. Durante o processo foram realizadas medições da turbidez para se verificar a variação desse parâmetro do início ao fim das lavagens e das descargas de fundo. Foi então retiradas 340 litros de LETA em baldes (Figura 7).

A campanha de coleta do LETA foi realizada conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.** abaixo:

Tabela 2: 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: Autor (2021)

Figura 7: Procedimento de Coleta das Amostras



Fonte: Autor (2021)

6.3 Polímeros

O trabalho foi feito com o uso de polímeros catiônicos, não-iônicos e aniônicos para servir de comparação de qual deles se saiu melhor na separação de sólidos da água quanto a Flotação por ar Dissolvido. Os polímeros são da fabricante Hidrodomi®. No Quadro 2 é mostrado as características dos polímeros:

Quadro 2: Características dos Polímeros

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

Fonte: Autor (2021)

Todos os polímeros foram preparados em uma concentração aquosa de 0,1%, ou seja, em um recipiente de 1L foram colocados 1g de polímero. Para a mistura foi levado os um litro de água para o Floteste em agitação por uma hora com elevado gradiente para garantir que o polímero se misture bem a solução.

6.4 Ensaios de Bancada

6.4.1 Planejamento de Experimentos

Os experimentos foram feitos conforme DOE – “Design of Experiments” que tem por objetivo o maior desempenho nos ensaios, ou seja, fazer com que ele tenha maior precisão nas estatísticas com o menor custo. A Metodologia usada nesse trabalho é a de Superfície de Resposta RSM – “Response Surface Methodology” ele tem a finalidade de melhor qualidade dos dados estabelecidos com diminuição da possibilidade de se ter variações e desempenho durante o processo (MEYERS et al, 2016).

Para fazer o uso do RSM utilizou-se em conjunto o DCCR Delineamento Composto Central Rotacional Conforme estabelecido por Montgomery (2013), que tem por objetivo demonstrar erros experimentais com sensibilidade a “outliers” dando mais estabilidade ao estudo o software utilizado para obtenção do DCCR foi o “Protimiza Experimental Design”.

O DCCR foi realizado com duas variáveis independentes. O DOE avaliou a eficiência do adensamento do LETA por quantitativo e qualitativo. No Quadro 3 a seguir mostra-se as variações dos métodos propostos:

Quadro 3: DCCR – Entrada de variáveis Qualitativas e Quantitativas

Adensamento	Qualitativa	Quantitativa	
		X_1	X_2
Flotação por Ar Dissolvido	Carga Iônica	Dosagem de Polímero	Taxa de Recirculação
		(mg pol/g SST)	(%)

Fonte: Autor (2021)

Foram feitas análises para cada um dos três polímeros para as variáveis qualitativas. X_1 representa a faixa de dosagem de polímeros de acordo com as Literaturas referente ao tratamento do LETA, variando as dosagens entre 1,0 e 8,0 mg pol/g SST, obedecendo o DOE. Para X_2 foi feito para se estabelecer a taxa de recirculação (TR) conforme estabelecido no quadro 3, usou-se de referência os pontos estabelecidos no trabalho de (CHAVES ET AL, 2013) e (HEDLUND, 2016). Essas pesquisas demonstram que tem diferentes valores e desempenho para a taxa de recirculação no índice de Turbidez, então os níveis ficaram entre 20 e 45%.

Após ser definido o X_1 e X_2 foram definidas as variáveis dependentes Y_1 , Y_2 e Y_3 que dependem dos valores estabelecidos em X_1 e X_2 . Dessa forma os ensaios foram feitos com objetivo de ter os parâmetros de a Velocidade de Sedimentação (Vsd), Velocidade de Clarificação (Vcl) e a Turbidez Remanescente da Água Clarificada (Tc).

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seguir mostram os pontos de ensaios e o planejamento baseado no DOE:

Tabela 3: Variáveis de análise para o Adensamento por FAD

Nome da Variável	Código	Nível				
		$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
Dosagem de Polímero (mg pol/g SST)	X_1	0,15	1,5	4,75	8	9,35
Taxa de Recirculação (%)	X_2	14,82	20	32,5	45	50,18

Fonte: Autor (2021)

Tabela 4: Planejamento Experimental - Adensamento por FAD

Ensaio	Variáveis	
	X ₁ Dosagem de Polímero (mg pol/g SST)	X ₂ Taxa de Recirculação (%)
1	1,5 (-1)	20 (-1)
2	8 (+1)	20 (-1)
3	1,5 (-1)	45 (+1)
4	8 (+1)	45 (+1)
5	0,15 (- α)	32,5 (0)
6	9,35 (+ α)	32,5 (0)
7	4,75 (0)	14,82 (- α)
8	4,75 (0)	50,18 (+ α)
9	4,75 (0)	32,5 (0)
10	4,75 (0)	32,5 (0)
11	4,75 (0)	32,5 (0)

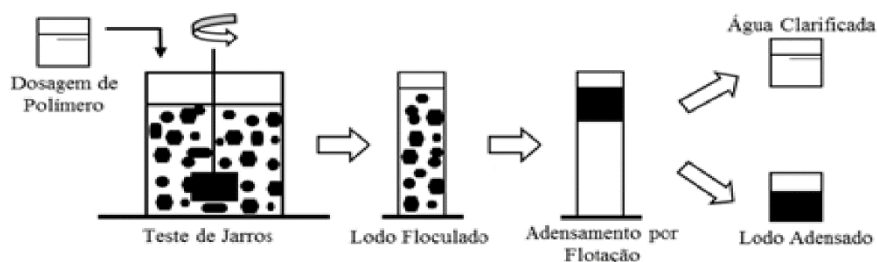
Fonte: Autor (2021)

6.4.2 Ensaio de Adensamento Por FAD

Os ensaios foram feitos em bancadas com o uso de equipamentos “Floteste” e “Jar test” sendo transferidos para proveta graduada. O LETA é floculado a partir da adição de polímero e sua mistura era realizada de forma rápida com 60 segundos, e gradiente também rápido 300s⁻¹. Para então ser transferido para uma proveta graduada.

A Figura 8 a seguir demonstra de forma resumida as etapas para obter a floculação no ensaio, conforme demonstra Zhao (2004 *apud* HEDLUND, 2016), porém adaptado pelo autor.

Figura 8 Esquemático dos Ensaio de Adensamento de FAD



Fonte: Adaptado Hedlund (2016)

Para o ensaio de Flotação por Ar Dissolvido foram adotados os métodos desenvolvidos por Reali e Patrizzi (1999), onde usou-se o floteste alimentado por batelada, onde os valores da altura da interface entre Lodo e a água foram anotados em função do tempo.

O tempo se ensaio propriamente dito foi bem rápido, daí a necessidade de dividir a contagem do nível do lodo com relação a água de 5 em 5 segundos para se obter dados mais precisos, dessa forma para todas as dosagens o ensaio terminava antes dos 5 minutos, bastando apenas verificar a estabilização da camada.

Segue a sequência de ensaio:

1. Preparou-se a Água com ar comprimido na Câmara de Saturação com intenção de ter o controle da pressão e manutenção interna, agitando em 6 atm durante 20 min. Fixando então nessa pressão após a agitação.
2. No “jarteste” foi adicionado o LETA para a agitação composta para homogeneização da mistura e preenchimento dos jarros do equipamento, sendo preenchidos 1 litro para cada ponto de análise;
3. Foram adicionadas as dosagens de polímero em solução em cada jarro conforme apresentado na tabela 4;
4. Foi executado a mistura rápida da solução do LETA com o polímero no jarro, com o Tempo de Mistura Rápida de 60 s e o Gradiente de Mistura Rápida em $300s^{-1}$;

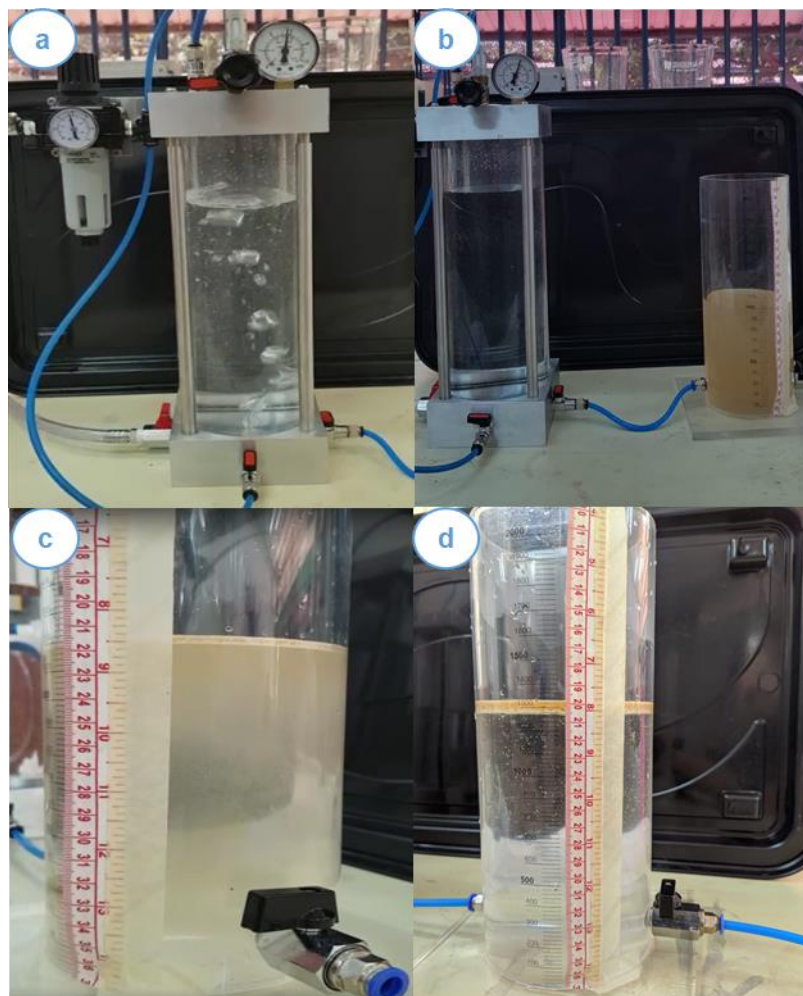
5. Após mistura, a solução era transferida imediatamente para Célula em acrílico de flotação com uma fita que informa a altura do lodo ao subir, mostrando assim a leitura da interface lodo/água;
6. Imediatamente após a transferência, foi adicionada na Célula de Flotação a água saturada, na parte inferior, com o ar e pressão de 6 atm, considerando a quantidade dessa água transferida conforme TR indicado na Tabela 4;
7. Logo ao fim da mistura da água saturada ao LETA com polímero, foi iniciada a leitura da interface entre o lodo e a água. As leituras foram feitas a cada 5s e com duração máxima de 5min;
8. Finalizado o ensaio, o volume de água do sobrenadante/clarificado era retirado em um compartimento na parte inferior da Cédula para a realização das leituras de Turbidez, Análise do SST do sobrenadante e lodo adensado;

No final do ensaio foram obtidos a velocidade de clarificação e obtendo também os gráficos das curvas de Adensamento a partir da altura da interfase lodo/água durante o ensaio. Com Base em Silveira (2014) a Concentração de Sólidos Totais no lodo adensado foi obtida conforme as Equações (1) e (2). As progressão das principais etapas do ensaio são mostradas na Figura 9 a seguir.

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

$$TS_{\text{sólidos}}_{Lodo} = \frac{SST_{Lodo}}{10.000} \quad \dots \text{Equação (2)}$$

Figura 9: Etapas dos Ensaio de Adensamento por FAD



(a) Câmara de saturação de Água; (b) Câmara de saturação + coluna de flotação no início do ensaio;
(c) Ensaio de Adensamento por FAD; (d) LETA adensado em coluna de Flotação.

Fonte: Autor (2021)

6.4.3 Análise de Dados

Para se obter dados estatísticos de confiança foi necessário usar um modelo matemático que tenha um padrão pré-estabelecido. Dessa forma o modelo escolhido foi o de utilizada a Análise de Variância ou ANOVA. Esse modelo por si só não é capaz de identificar entre qual desses parâmetros está a diferença é significativa. Para complementar essa análise foi utilizada o teste de Tukey a fim de se obter as comparações múltiplas. Para a análise de significância foi admitido um nível de confiabilidade de 10%.

Foi utilizado o software *Statística 10* para os testes de ANOVA com Tukey. O processo de conseguir a estatística dos ensaios contou com as seguintes etapas:

1. Ter o resultado do grau de significância (p-valor) para os valores das variáveis da pesquisa após o tratamento no software *Protimiza Experimental Design*;
2. Confecção do modelo matemático com os coeficientes das respectivas variáveis com as respostas quando obtido um resultado de significância;
3. Realização de Análise de Variância (ANOVA) para cada modelo para a verificação dos valores previstos e, depois, analisar se eram adequados aos valores experimentais;
4. Elaboração de Gráficos da Superfície de Resposta para cada índice de desempenho após a validação do modelo pela ANOVA.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados, discutidos e discutidos os resultados dos ensaios desta pesquisa. O primeiro tópico desse capítulo vai se retratar dos dados da água de estudo. Em seguida serão colocados os dados para Turbidez do sobrenadante e velocidade de clarificação e adensamento por FAD com base nos ensaios utilizando os três polímeros.

Para efeito de discussão serão mostrados nesse capítulo apenas os modelos matemáticos que obtiveram um resultado estatístico de relevância e também o fundamento dos resultados com a devida análise. Os restantes dos modelos e gráficos obtidos a partir dos ensaios que não obtiveram resultados estatísticos coerentes estão nos Apêndices A e B no final dessa pesquisa.

7.1 Água de estudo

As características físico química dos três LETAS que foram utilizados para a realização dessa pesquisa são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 5: 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	2,46	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	7,3
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	2	148	11	495	160
Sólidos Totais	mg/L	87	241	105	593	247
Turbidez	uT (NTU)	0,9	89,7	60,7	262	95,1

Fonte: Autor (2021)

Com exceção da descarga de fundo FAP que marcou uma turbidez de 262 todas as outras amostras mostraram valores mais baixos desse mesmo parâmetro. Isso era de se esperar, visto que esse parâmetro indica um número maior de sólidos na água que, nesse caso, já era visível que a DFU tinha mais que as demais. A explicação para esse maior volume de sólidos se deve

ao fato de que a DFU realiza descargas pontuais durante a operação da planta e possui uma carreira mais longa somado ao fato de que esse resíduo tem origem de uma região cujo tratamento de água retém uma quantidade significativa de sólidos.

Observando dois parâmetros da água bruta, Turbidez de 0,9 NTU e sólidos 87 mg/l pode se perceber o alto nível de qualidade da água que teve um tratamento bem feito. Entende-se então que a escolha do tratamento por Dupla filtração foi adequado.

Com relação aos dados dos metais das amostras, que são eles alumínio, ferro e manganês, pode se observar que os níveis de alumínio e manganês estão dentro de um valor considerados irrisórios. Porém a maior quantidade está para o ferro que no DFU chega a 18,45 mg/L, enquanto do FAP um pouco menor com 7,42 mg/L, esses números são compreensíveis visto que é uma indicação do uso de metais ferrosos pela ETA como agentes coagulantes. Essa é a primeira etapa de filtração da água após receber os coagulantes e, portanto, a parte que mais retém os minerais. Ao final do tratamento a concentração de ferro diminui drasticamente, isso é demonstrado através do parâmetro desse material na água bruta e no FRD com valores menores que 0,59 mg/L provando novamente que o tratamento está sendo bem feito.

A DFU foi a etapa que mais reteve sólidos de forma geral, isso é mostrado mais uma vez com o parâmetro que analisa a matéria orgânica, onde novamente a retenção foi maior de carbono orgânico total chegou a 7,796 mg/L. A presença de material orgânico nessa etapa junto ao ferro mostra a justificativa para o uso desse coagulante para o tratamento da água, visto que o coagulante com esse tipo de sal é ideal para remoção de matéria orgânica, sendo mais eficiente, por exemplo, que o de alumínio (COSTA et al, 2000).

Com essas análises e visto o comportamento dos parâmetros para cada etapa do tratamento da água estudada pode se perceber que tudo foi fundamentado. O uso dessa água, portanto, foi a ideal para o estudo dessa pesquisa por ser um LETA característico de uma Estação de dupla Filtração com pouca turbidez e Concentração de Sólidos. A combinação de uma água de baixo teor de sólidos visto o tipo de metodologia usada nessa pesquisa, mostra a oportunidade de avaliar o adensamento alcançado.

A Figura 10 a seguir mostra o processo de mistura dos 3 LETAs: FAD, FRD e DFU a fim de obter a amostra composta.

Figura 10: Amostra Composta - Água de Estudo



Fonte: Autor (2021)

7.2 Ensaios No Laboratório

Esse capítulo mostra a eficiência dos 3 tipos de polímeros usados nessa pesquisa sendo usados no método de adensamento proposto. Os dados obtidos foram avaliados para efeito de comparação utilizando estatística, através da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) onde foram avaliadas a taxa de recirculação na concentração de sólidos e na turbidez do sobrenadante e a influência dos parâmetros de dosagem do LETA. Posteriormente foi utilizado o método de comparação de médias Anova/Tukey que permitiu avaliar o efeito que cada carga do polímero tinha no adensamento.

Para otimizar as respostas dos ensaios de bancada foi utilizado o método Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) onde as variáveis Velocidade de Adensamento/Sedimentação, Turbidez Remanescente do Sobrenadante, e Clarificação do LETA foram feitas com maior precisão. Para efeito estatístico dessa pesquisa foi adotado um nível de significância de 10%, portanto os resultados têm 90% de chance se estarem corretos.

7.2.1 Turbidez do Sobrenadante

A água de Recirculação deve ter Turbidez Remanescente de 10 uT para ser considerada adequada. Conforme demonstrado nas literaturas esse valor é o ideal para se obter uma boa eficiência de Filtração lenta com a desinfecção final adequada e produção de água com baixa

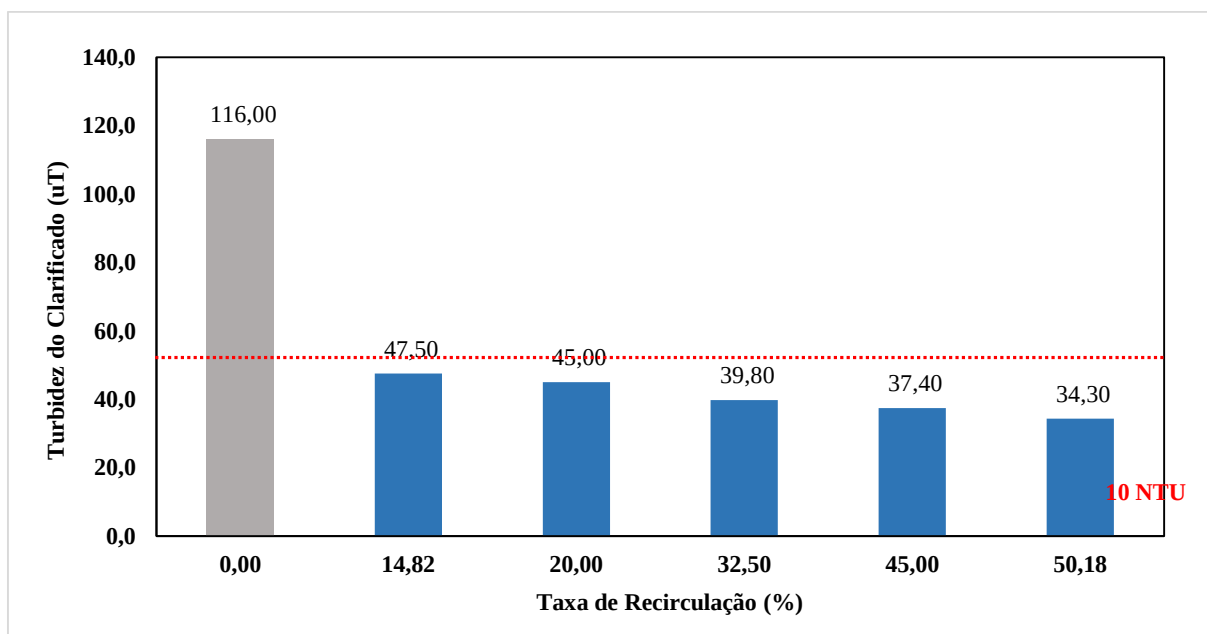
turbidez (DI BERNARDO *et al*, 1999). Dessa forma só foram considerados adequados, conforme a literatura, valores de turbidez menores que 10%, ou seja, no caso da água de estudo com 116 NTU, valores abaixo de 11,6 NTU para sobrenadante eram considerados adequados.

Dessa forma nessa pesquisa o ensaio de Flotação Por Ar Dissolvido com diferentes taxas de Reciclagem, não foi possível fazer a observação completa para verificar o sobrenadante, pois no ensaio sempre sobrava um restante de material sedimentado no fundo do jarro. Esse tipo de comportamento também ocorreu em outros estudos conforme cita Hedlund (2016), a FAD quando feita apenas com o LETA e sem adição de polímeros apresenta formação significativa de camada de material flotado e outra de material adensado.

Os resultados da Turbidez remanescente provaram que a eficiência é muito ruim do uso de FAD para esse LETA, pois a menor turbidez foi de 34,3 NTU, tendo uma taxa de recirculação de 50,18% enquanto o maior valor foi de 47,5 NTU atingindo uma taxa de recirculação de 14,82%. Dessa forma a maior eficiência de remoção de turbidez dentre todos ensaios foi de 64% sem o uso de polímero.

Conforme apontado pelo Hedlund (2016) esses resultados mostram que, para o LETA sem polímeros, há uma redução na Turbidez à medida em que se aumenta a Taxa de Reciclo, o que pode ser observado no Gráfico da Figura 11.

Figura 11: Adensamento por FAD - Turbidez Remanescente no LETA



Fonte: Autor (2021)

Conforme demonstrado por Hedlund (2016) conforme se adiciona água no ensaio e, por consequência aumenta a quantidade ar pela pressão, menor a turbidez em ensaios onde não foram usados o uso de polímeros, isso ocorre porque a maior quantidade de água dilui o sistema, que já tem uma quantidade considera pequena de sólidos, e a maior quantidade de ar faz a flotação dos deles. Isso é provado nos valores obtidos com os resultados finais da Turbidez do sobrenadante que foram verificados em diferentes taxas de recirculação.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seguir mostra os resultados da T urbidez do sobrenadante nos ensaios em que foi utilizado o uso dos três polímeros.

Tabela 6: Turbidez do Sobrenadante - DCCR do Adensamento por FAD

Ensaio	Variáveis		Tipo de Polímero		
	X ₁ - Dosagem de Polímeros (mg Pol/gSST)	X ₂ - Taxa de Recirculação (%)	CAT	ANI	NION
1	1,5 (-1)	20 (-1)	7,3	8,9	8,2
2	8 (+1)	20 (-1)	2,4	12,1	2,8
3	1,5 (-1)	45 (+1)	7,5	11,7	6,4
4	8 (+1)	45 (+1)	4,1	13,4	1,5
5	0,15 (-α)	32,5 (0)	3,9	18,7	10,1
6	9,35 (+α)	32,5 (0)	4,3	9,8	1,2
7	4,75 (0)	14,82 (-α)	2,1	11,7	2
8	4,75 (0)	50,18 (+α)	4,1	13,9	2,4
9	4,75 (0)	32,5 (0)	3,6	12,8	1,4
10	4,75 (0)	32,5 (0)	1,6	11,7	1,3
11	4,75 (0)	32,5 (0)	2,7	12,3	1,5

Fonte: Autor (2021)

Observando A Tabela 6 percebe-se que com o uso dos polímeros aniônicos foram os que tiveram pior resultados no seu uso comparado aos outros dois, com números de Turbidez bem maiores.

De forma geral os melhores resultados foram para o uso dos polímeros não-iônicos, apesar de que na variável X₁ com dosagem de 0,15mg Pol/gSST e na variável X₂ com taxa de recirculação de 32,5% o valor da turbidez do sobrenadante chegou a 10,1. Sendo esse valor maior que todos os resultados obtidos dos polímeros catiônicos.

A análise feita da Tabela 6 é meramente para fins observatórios, pois não pode ser considerado reais, visto que para ter essa veracidade é necessário ter dados estatísticos para comprovarem o padrão do experimento como sendo real.

Dessa forma considerando as dosagens de polímeros estabelecidas, é apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** o tratamento estatístico da Turbidez do S obrenadante (T_{sd}) para os três polímeros pesquisados. Foram considerados de interesse e relevância para análise todos os valores de p-valor que se encontram abaixo de 0,10 dos quais apontam efeito estatístico das variáveis independentes (X_1 ou X_2) sobre a variável de interesse com nível de confiança de 90%.

Tabela 7: Análise p-valor da Turbidez - Adensamento

Variáveis	Tipo de Polímero		
	CAT	ANI	NION
$X_{1-(L)}$	0,2045	0,4183	<0,0001*
$X_{1-(Q)}$	0,1955	0,7202	0,0004*
$X_{2-(L)}$	0,4163	0,4459	0,35
$X_{2-(Q)}$	0,4376	0,8627	0,1489
$X_1 \cdot X_2$	0,7201	0,8203	0,8065

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

Fonte: Autor (2021)

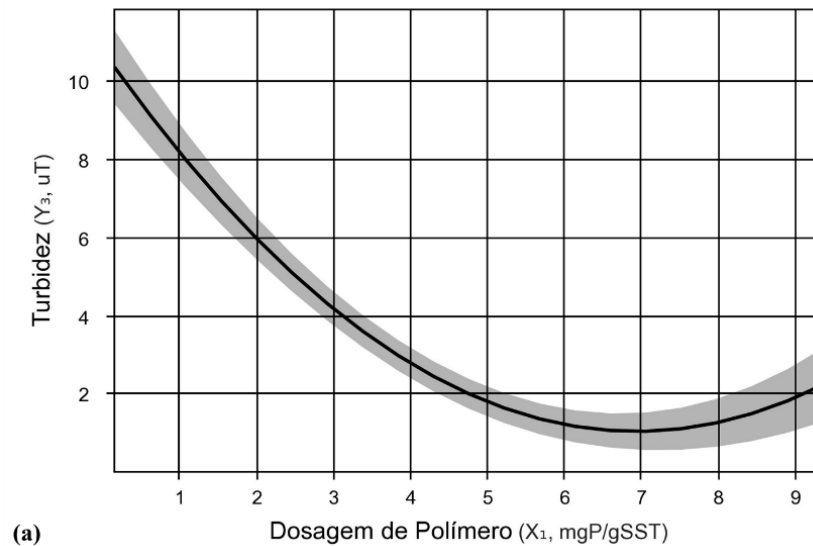
Pode se observar na tabela 7 que os valores das variáveis não obtiveram nem um efeito estatístico significativo para as variáveis X_1 ou X_2 nos polímeros catiônicos e aniônico, pois todos os valores das variáveis foram maiores que 0,1. No entanto, apesar de não ter uma variável X_2 significativa, para a variável X_1 os Polímeros Não-Iônicos apresentaram significância estatística para a Dosagem de Polímeros.

Para efeito de validação matemática foram considerados apenas p-valor abaixo de 0,1 nessa pesquisa, dessa forma foram elaborados os modelos matemáticos que representam a relação observada entre as variáveis dependentes para com as variáveis de resposta utilizando a Análise de Variância (ANOVA) para a validação, utilizando gráficos para mostrar os resultados. As demais respostas gráficas de irrelevância nesse estudo foram colocadas no Apêndice A desse trabalho.

Dessa forma para todos os modelos avaliados com relevância estatística a remoção de Turbidez foi superior a 90%. Apesar de não ter relevância estatística, visualmente pode ser

observado a grande diferença na eficiência de remoção de sólidos e, portanto, a turbidez quando se fazia a utilização dos polímeros comparado ao ensaio sem polímero (Figura 13). O gráfico na Figura 12 a seguir mostra a Superfície de resposta da Turbidez Remanescente da variante X_1 .

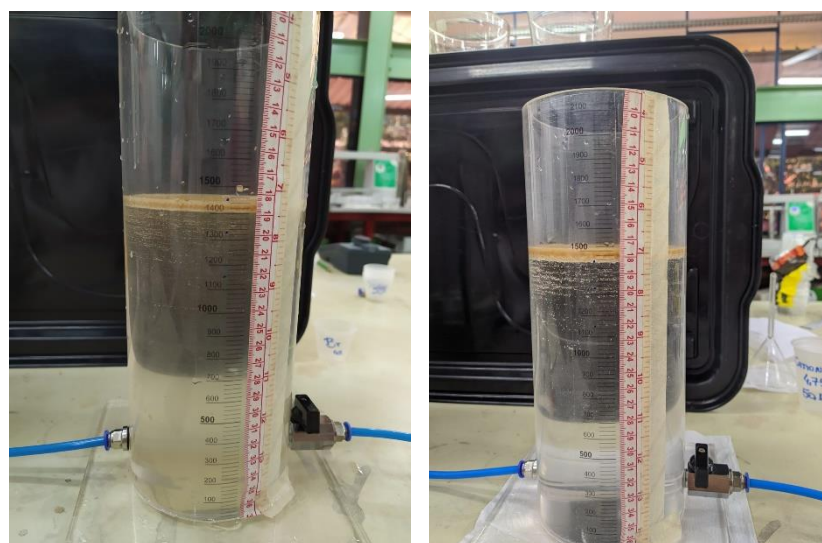
Figura 12: Superfícies de resposta da Turbidez Remanescente - Adensamento por FAD



(a) Polímero Não-Iônico

Fonte: Autor (2021)

Figura 13: Comparação da Turbidez – sem polímero x com polímero



(a) sem uso de polímero; (b) com uso de polímero;

Fonte: Autor (2021)

7.2.2 Velocidade de Clarificação (V_{cl}) e Sedimentação (V_{sd}) no adensamento FAD

A Velocidade de Sedimentação (V_{sd}) e a Velocidade de Clarificação (V_{cl}) fornecem parâmetros necessários para a construção de uma orientação do comportamento dos ensaios de adensamento de Flotação por Ar Dissolvido. Tais parâmetros são determinados a partir das curvas geradas da interface de clarificação/adensamento *versus* tempo.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os valores codificados (entre parênteses) e reais das Velocidades de Sedimentação e Clarificação observadas para os três polímeros avaliados nos ensaios de Adensamento por Flotação por Ar Dissolvido. O Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) foi realizado com o intuito de otimização através do padrão de eficiência estabelecido de maior que 90% mostrando quais ensaios estão válidos, considerando as variáveis de entrada X_1 (Dosagem de Polímeros) e X_2 (Taxa de Recirculação).

Tabela 8: V_{cl} e V_{sd} - DCCR Adensamento por FAD

Ensaio	Variáveis		Velocidade de Clarificação (cm/min)			Velocidade de Sedimentação (cm/min)		
	X_1 - Dosagem de Polímeros (mg Pol/gSST)	X_2 - Taxa de Recirculação (%)	CAT	ANI	NION	CAT	ANI	NION
1	1,5 (-1)	20 (-1)	11,77	8,02	7,91	9,01	6,16	5,96
2	8 (+1)	20 (-1)	8,53	6,2	13,78	8,88	5,06	10,56
3	1,5 (-1)	45 (+1)	11,81	12,33	7,48	8,11	8,2	7,08
4	8 (+1)	45 (+1)	19,51	14,38	9,43	17,71	10,53	7,91
5	0,15 ($-\alpha$)	32,5 (0)	8,14	9,61	15,73	7,24	7,82	12,9
6	9,35 ($+\alpha$)	32,5 (0)	14,83	5,93	8,37	10,86	5,22	5,98
7	4,75 (0)	14,82 ($-\alpha$)	11,1	6,96	12,51	8,48	6,48	9,8
8	4,75 (0)	50,18 ($+\alpha$)	12,32	6,99	9,44	8,2	6,75	7,51
9	4,75 (0)	32,5 (0)	12	6,49	12,21	10,07	5,58	11,15
10	4,75 (0)	32,5 (0)	11,86	6,45	12,07	9,38	5,55	10,75
11	4,75 (0)	32,5 (0)	12,07	6,7	12,28	9,6	6	10,86

Fonte: Autor (2021)

De acordo com a Tabela 8 pode perceber que o polímero catiônico se destacou bem mais que os outros dois, ainda mais quando se compara o parâmetro de velocidade de clarificação. O destaque desse polímero está para dosagem 8 em uma taxa de recirculação de 45%, onde a

velocidade de clarificação foi de 19,51cm/min e a velocidade de sedimentação foi de 17,71cm/min, sendo a mais eficiente de todo o ensaio.

Na prática, percebe-se que o polímero catiônico é responsável por aglomerar mais os sólidos, formando flocos maiores, portanto durante o ensaio uma maior quantidade de sólidos sofre a flotação com mais precisão, isso explica a maior eficiência desse coagulante dentre os outros. No entanto outro aspecto observado do polímero catiônico é sua característica particular de ser mais colante, isso é percebido através dos dados que mostram que quanto maior a taxa de recirculação, maior a eficiência do polímero. Juntando essas duas características percebe-se que quanto menor a taxa de recirculação e menor a dosagem, menor a eficiência do polímero.

O polímero aniônico segue uma lógica parecida, porém ele não tem a mesma capacidade do catiônico de forma flocos maiores. Já o não-iônico tem característica particular e melhor que a aniônica. Percebe-se nesse polímero que a menor dosagem teve melhores eficiências sendo de 15,73cm/min na velocidade de clarificação e 12,9cm/min para velocidade de sedimentação enquanto a maior dosagem teve uma das piores eficiências sendo 5,93cm/min na velocidade de clarificação e 5,98cm/min para velocidade de sedimentação. Para a mesma dosagem o polímero não-iônico teve eficiência equivalente para taxa de circulação entre 14,82% e 32,5%, porém quando sobe para 50,18% a eficiência cai consideravelmente.

É importante salientar que esses dados foram obtidos a partir dos ensaios feito, mas com o uso do modelo matemático para se ter um intervalo estatisticamente relevante, os dados obtidos pelos polímeros aniônicos e não-iônicos não são considerados confiáveis. Portanto as análises feitas sobre esses dois polímeros são apenas para fins demonstrativos.

A partir dos dados obtidos nas respostas das variáveis é apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** os números estatísticos da Velocidade de Clarificação (V_{Cl}) e da Velocidade de Sedimentação (V_{sd}) para cada um dos polímeros. Todos os valores de p-valor que se encontram abaixo de 0,10 não são considerados relevantes para aponta um efeito estatístico da variável independente (X_1 ou X_2). Sendo as variáveis de interesse com nível de confiança de 90%.

Tabela 9: 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
$X_{1-(L)}$	0,0460*	0,5597	0,7803	0,0545*	0,5891	0,57
$X_{1-(Q)}$	0,9215	0,3126	0,7	0,7902	0,3583	0,3773
$X_{2-(L)}$	0,0605*	0,1761	0,3473	0,2534	0,1215	0,5361
$X_{2-(Q)}$	0,8157	0,4673	0,4496	0,9019	0,3267	0,2388
X_1, X_2	0,0325*	0,5218	0,5571	0,0650*	0,3047	0,4904

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

Fonte: Autor (2021)

Avaliando os valores assumidos por X_1 (Dosagem de Polímeros) e X_2 (Taxa de Recirculação), é possível perceber que estes parâmetros obtiveram efeito estatístico significativo apenas para as dosagens com polímeros catiônicos, isso foi possível ser constatado visualmente, pois o material quando estava em flotação percebia-se a quantidade de sólidos concentrados e o quanto o LETA estava mais claro. Portanto estatisticamente os polímeros catiônicos foram aqueles com a melhor coagulação/floculação dos sólidos suspensos no LETA.

Por se tratar de ensaios estatísticos e com possibilidades de precisão imperfeitas muitos dados chegaram perto de ficar menos de 10% para ter dados usuais. Por exemplo na variável $X_{2-(L)}$ o polímero aniônico tanto na velocidade de Clarificação quanto na de Sedimentação tiveram valores de 0,1761 e 0,1215 respectivamente, isso mostra que de forma geral esses valores estariam nessa faixa mesmo se fosse repetido o ensaio. Na mesma variável o polímero catiônico teve valor relevante apenas na velocidade de clarificação, apontando valor muito elevado para sedimentação, por se trata de possibilidades isso é perfeitamente normal e aceitável.

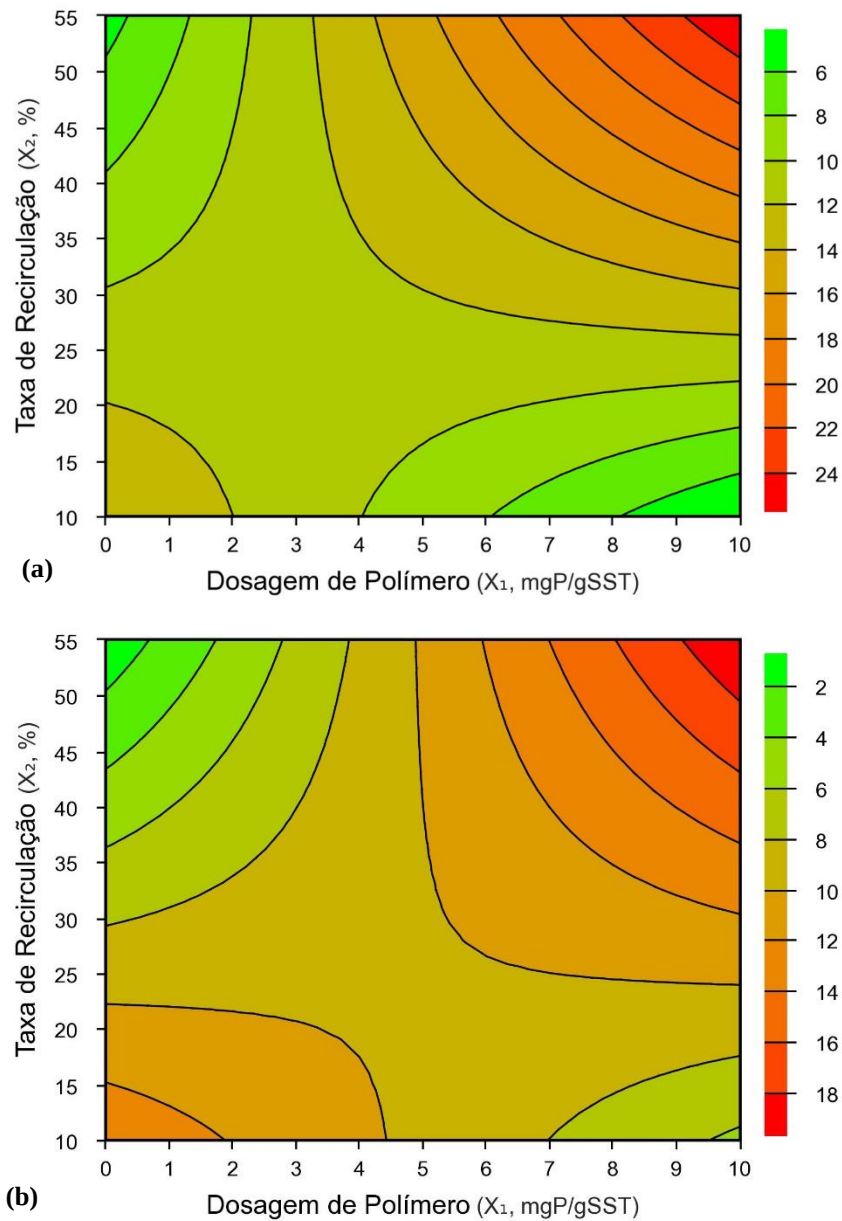
Tirando esses valores que podem gerar questionamento quanto a natureza dos seus resultados, todos as outras variáveis estão condizentes com seus resultados quando comparado sua velocidade de clarificação vs velocidade de sedimentação por se tratar de parâmetros diretamente proporcionais. Fica esclarecido, então, que apesar das estatísticas ter valores bem diferentes, a possibilidade de isso acontecer é pequena.

Assim, com base nos p-valores com significância para valores menores que 10%, foi elaborado o modelo matemático que equaciona a relação observada entre as variáveis dependentes e as variáveis de resposta de forma a ter maior precisão dos resultados do ensaio. No caso do LETA apresentado o comportamento dele pode ser descrito por meio de um modelo

matemático linear. Com a Análise de Variância (ANOVA) para a validação do modelo matemático foi gerado o gráfico das variáveis que estão dentro do valor aceitável. Os demais modelos que não alcançaram um padrão estatístico relevante são apresentados no Apêndice desta dissertação.

O par das variáveis Taxa de Recirculação e Dosagem de Polímeros possuem significância estatística, indicando que a variação de qualquer um destes mudará o valor final das velocidades obtidas. Os gráficos mostrados na Figura 14 apresentam o comportamento estabelecido nas Velocidades de Clarificação e Sedimentação em função das variáveis Dosagem de Polímero (X_1) e da Taxa de Recirculação (X_2).

Figura 14: Superfícies de resposta da V_{Cl} e V_{sd} – Polímero Catiônico



(a) Velocidade de Clarificação; (b) Velocidade de Sedimentação

Fonte: Autor (2021)

Esses dois gráficos representam o comportamento do polímero catiônico, pois é o único polímero que teve dados estatísticos relevantes para o estudo, ele demonstra de forma didática o que foi comentado na Tabela 8. Quanto mais vermelho o local do gráfico maior a eficiência e, portanto, maior os parâmetros de dosagem do polímero e taxa de recirculação.

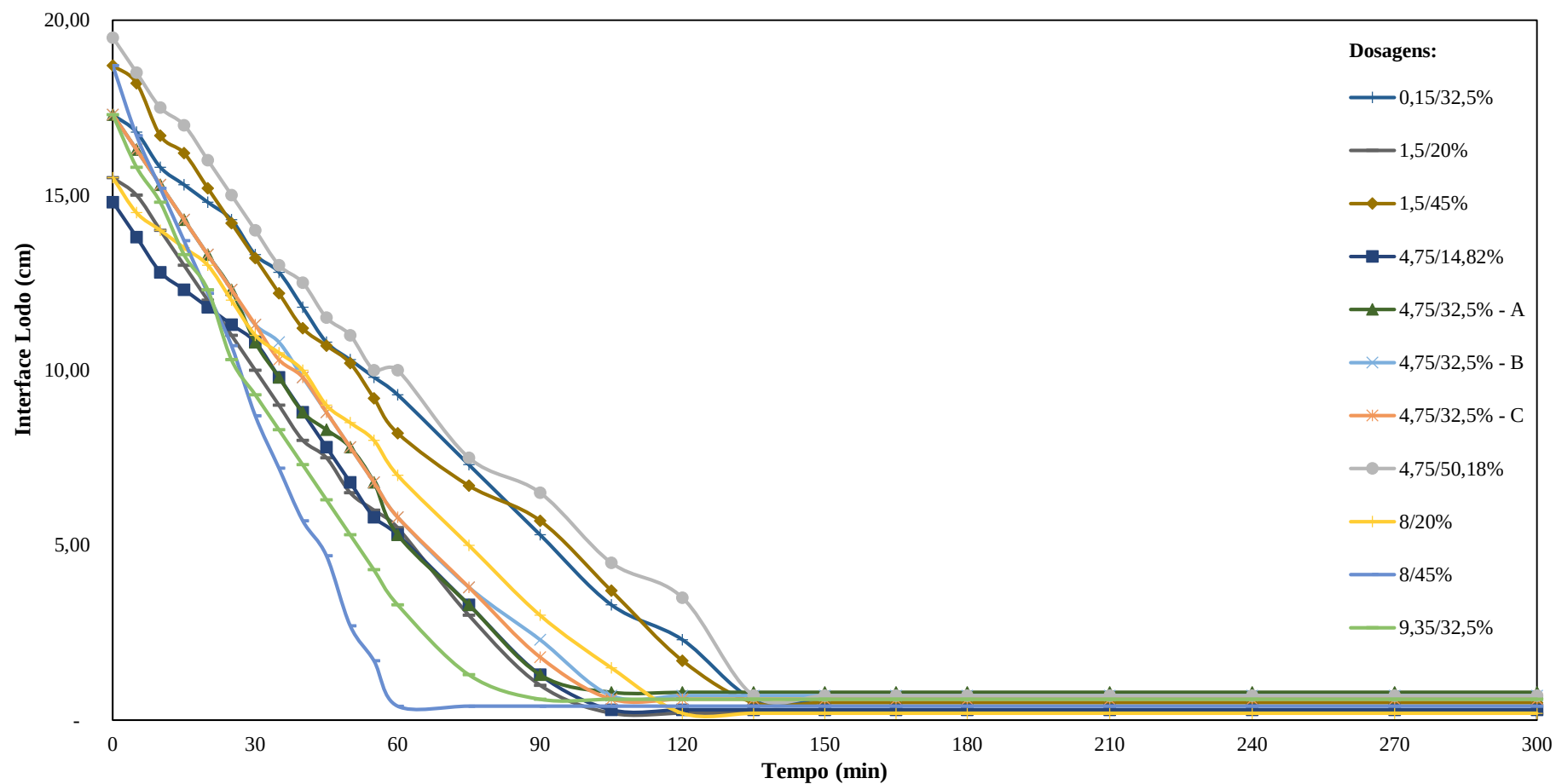
Os resultados obtidos pela adição de polímeros catiônicos superaram a V_{Cl} e V_{sd} em 130% e 150%, quando comparados às Velocidades de Clarificação e Sedimentação da amostra sem o

uso de polímeros, respectivamente, para uma mesma Taxa de Recirculação. Comparando também o tempo médio do ensaio sem polímero em relação com o polímero, que foi determinado a partir do ponto em que a curva de adensamento tem sua estabilidade observada, as amostras sem o uso de polímeros levaram cerca de 105s para estabilização completa do LETA. Isso com relação ao ponto com maior eficiência/velocidade com o uso do polímero catiônico (X_1 : 8,0 mgPol/gSST e X_2 : 45%), o tempo de estabilização do ensaio foi de 60s, ou seja, uma redução de 42,9%.

Comparando o sem polímero e o com polímero levando em consideração a mesma taxa de recirculação a diferença entre os tempos de término dos ensaios é menor, mas ainda bastante significativa com cerca de 33%. Isso mostra que essa quantidade de água usada na taxa de recirculação é melhor, e juntando com o polímero a eficiência é ainda maior.

Apesar de alguns dados apresentarem melhora com o uso do polímero, outros valores como os contendo Dosagens de Polímeros abaixo de 8,0 mgPol/gSST ou Taxa de Recirculação inferior à 32,5%, tiveram suas Velocidades de Clarificação e Sedimentação com desempenho abaixo daqueles obtidos com o LETA sem uso de polímeros. Dessa forma nos ensaios de adensamento Por Ar Dissolvido junto as características do LETA e as dosagens avaliadas pelo polímero catiônico que a Velocidade de Clarificação e Sedimentação serão maiores conforme se aumenta a dosagem do polímero e a taxa de Recirculação (Figura 15).

Figura 15: Curvas de Adensamento por FAD - Polímero Catiônico



Fonte: Autor (2021)

7.3 Pré-Dimensionamento das unidades

Assim que foram feitos os ensaios das Velocidades de Clarificação e Sedimentação tem-se os parâmetros necessários para se estimar as áreas com base em no método avaliado. Esta estimativa faz uma análise prévia de viabilidade na implantação da tecnologia de adensamento.

Considerando os dados obtidos das velocidades através das curvas do adensamento, foi determinada a Área de Clarificação (A_{Cl}) e a Área de Sedimentação (A_{sd}) para o sistema de Adensamento de Flotação por Ar Dissolvido (3) e (4), conforme foi proposto por (DI BERNARDO L. *ET AL*, 2002).

- Área de Clarificação (A_{Cl})

- Adensamento por FAD: $A_{Cl} = K_{Cl} \times \frac{Q_{res} + Q_r}{V_{Cl}}$ Equação (3)

- Área de Sedimentação (A_{sd})

- Adensamento por FAD: $A_{sd} = K_{sd} \times \frac{Q_{res} + Q_r}{V_{sd}}$ Equação (4)

Onde:

Q_{res} : Vazão de resíduo afluente ao tanque de adensamento (m^3/min)

Q_r : Vazão de Recirculação (m^3/min)

K_{Cl} e K_{sd} : Coeficiente de Segurança da clarificação e sedimentação devido à mudança de escala

V_{Cl} : Velocidade de Clarificação (cm/min)

V_{sd} : Velocidade de Sedimentação (cm/min)

Usando as equações é obtido o resultado da área de clarificação e sedimentação conforme é mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 10: Dimensionamento das unidades de adensamento

Área (m^2)	Adensamento Por FAD
Clarificação	69,5
Sedimentação	62,08

Fonte: Autor (2021)

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme os resultados obtidos no laboratório, com essa pesquisa percebe-se análises importantes para serem pontuadas como as características encontradas nos LETAs que convergiram com os objetivos esperados, sendo que por se tratar de um efluente característico de Estações de Dupla Filtração ele vem com característica de baixa turbidez e Concentração de Sólidos.

Quanto a metodologia estatística de Superfície de Resposta (RSM) mostrou ser pouco eficiente para análise estatística obtida dos dados dos parâmetros de Dosagem de Polímeros e Taxa de Recirculação. Pois apenas 2 das 15 formas diferentes colocadas das variáveis na análise da turbidez do sobrenadante obtiveram sucesso, enquanto 5 das 60 variáveis da Velocidades de Clarificação e Sedimentação obtiveram sucesso.

A Dosagem de Polímeros apresentou eficiência estatística na remoção da turbidez apenas para carga não-iônicas com possibilidade de sucesso superior a 90%. Já sem o uso do polímero a remoção da Turbidez através da FAD não se mostrou um método eficiente. Pois os valores alcançados apresentaram eficiências na remoção de Turbidez de, no máximo, 64%.

Não houve redução do tempo quando usado o polímero em relação aos ensaios sem o uso para remoção de turbidez. Considerando o tempo de estabilização da zona de compressão, na aplicação de polímeros catiônicos obteve uma redução de tempo em 33% se comparado à amostra sem o uso de polímeros para uma mesma taxa de recirculação, tendo uma estabilização em cerca de 60s após o início dos ensaios.

Os polímeros catiônicos foram os que obtiveram os maiores valores para Velocidade de Sedimentação e Clarificação de V_{Cl} e V_{sd} , 19,51 cm/min e 17,71 cm/min no Adensamento. Sendo assim esses valores incrementaram em 130% e 150%, respectivamente, nos resultados obtidos quando comparados com as velocidades se do LETA sem o uso de polímeros.

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.

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: 01 jul. 2018.

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.

CHAVES, K. O. *et al.* Eficiência da Flocculação em Cortinas Integrada à Flotação por Ar Dissolvido Aplicada ao Tratamento de Água de Lavagem de Filtros. **Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo, y Práctica**, S.L, v. 8, n. 3, p. 312-327, 6 dez. 2015. ISSN 0718-378X.

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.

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

COUTINHO, W. **Emprego da Flotação a Ar Dissolvido no Tratamento de Cursos D'água: Avaliação de desempenho dos Córregos Ressaca e Sarandi afluentes à represa da Pampulha**. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.,

DI BERNARDO, L.; WIECHETECK, G. K; BENINI B. D. S. **Utilização da dupla filtração ascendente de areia grossa para remoção de substancias húmicas**. In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2003. Anais. Joinville, 2003.

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.; 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.

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.

GRANDIN, S. R. **Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água**. 1992. 456 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992. MILLER, M. L. et al

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.

HAACK, 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.

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.

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.

KREMMER, 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

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.

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

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.

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.

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.

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.

APÊNDICE A

TRATAMENTO ESTATÍSTICO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PROPOSTO – DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL

Adensamento por FAD: Polímero Catiônico

- Turbidez do Sobrenadante

Tabela 11: Resultados da Regressão da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Catiônico – Adensamento por FAD

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	2,63	1,08	2,43	0,0592
X₁	-0,97	0,66	-1,46	0,2045
X₁²	1,18	0,79	1,49	0,1955
X₂	0,59	0,66	0,89	0,4163
X₂²	0,66	0,79	0,84	0,4376
X₁. X₂	0,36	0,94	0,38	0,7201

Fonte: Autor (2021)

Sem modelo estatístico que atenda p-valor > 0,10. Valores aderentes à média dos ensaios.

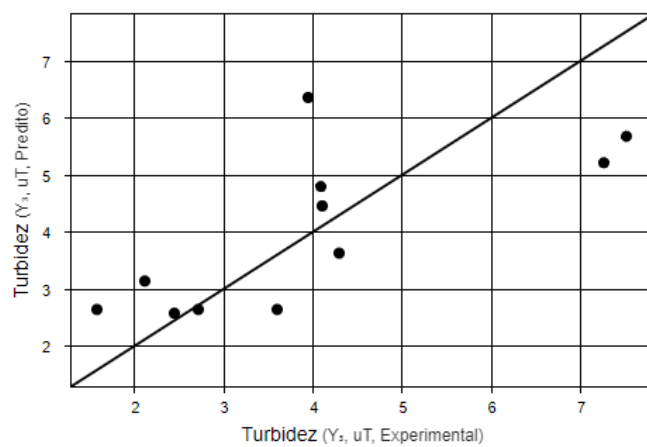
Tabela 12: Análise de Variância da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Catiônico – Adensamento por FAD

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	19,2	5	3,8	1,1	0,46236
Resíduos	17,5	5	3,5		
Falta de Ajuste	15,5	3	5,2	5,0	0,17013
Erro Puro	2,0	2	1,0		
Total	36,7	10			

Fonte: Autor (2021)

R²: 52,22%

Figura 16: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por FAD com Polímero Catiônico



Fonte: Autor (2021)

- Velocidade de Clarificação

Tabela 13: Resultados da Regressão da Velocidade de Clarificação com Polímero Catiônico – Adensamento por FAD

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	12,18	0,48	25,47	0,0000
X₁	1,74	0,56	3,10	0,0172
X₁²	-	-	-	-
X₂	1,59	0,56	2,84	0,0250
X₂²	-	-	-	-
X₁. X₂	2,74	0,79	3,45	0,0107

Fonte: Autor (2021)

Modelo estatístico para $p\text{-valor} \leq 0,10$: $Y = 12,18 + 1,74 x_1 + 1,59 x_2 + 2,74 x_1 x_2$

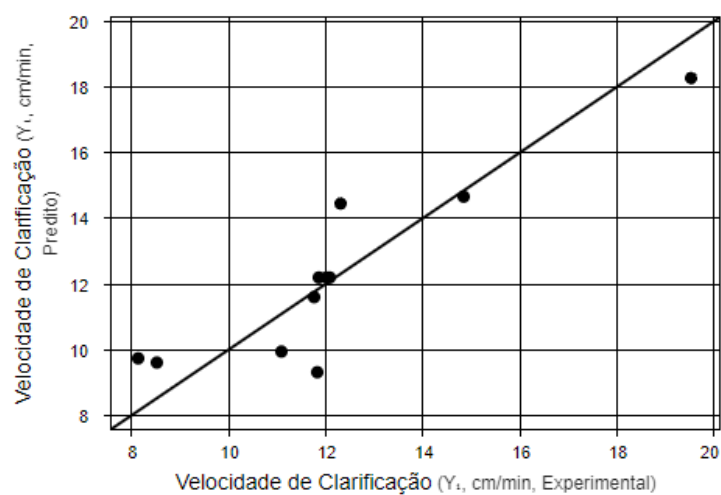
Tabela 14: Análise de Variância da Velocidade de Clarificação com Polímero Catiônico – Adensamento por FAD

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	74,4	3	24,8	9,9	0,00657
Resíduos	17,6	7	2,5		
Falta de Ajuste	17,6	5	3,5	317,2	0,00315
Erro Puro	0,0	2	0,0		
Total	92,0	10			

Fonte: Autor (2021)

R²: 80,88%

Figura 17: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por FAD com Polímero Catiônico



Fonte: Autor (2021)

- Velocidade de Sedimentação

Tabela 15: Resultados da Regressão da Velocidade de Sedimentação com Polímero Catiônico
– Adensamento por FAD

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	9,78	0,57	17,05	0,0000
X₁	1,82	0,67	2,71	0,0266
X₁²	-	-	-	-
X₂	-	-	-	-
X₂²	-	-	-	-
X₁. X₂	2,43	0,95	2,56	0,0338

Fonte: Autor (2021)

Modelo estatístico para p-valor $\leq 0,10$: $Y = 9,78 + 1,82 x_1 + 2,43 x_1 x_2$

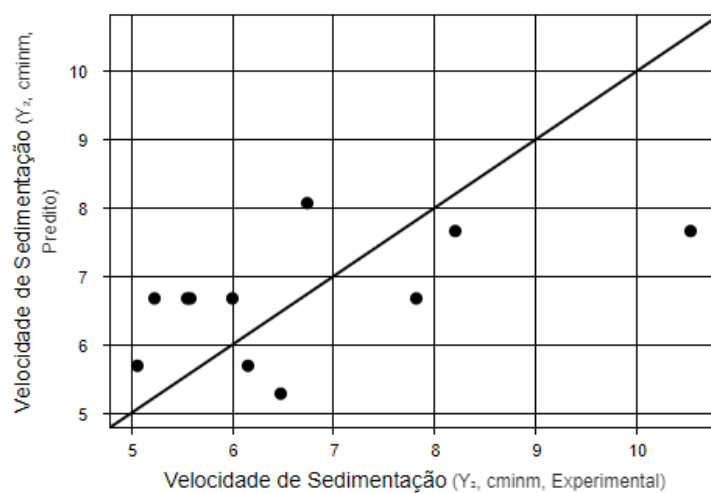
Tabela 16: Análise de Variância da Velocidade de Sedimentação com Polímero Catiônico –
Adensamento por FAD

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	50,2	2	25,1	6,9	0,01781
Resíduos	28,9	8	3,6		
Falta de Ajuste	28,7	6	4,8	38,8	0,02533
Erro Puro	0,2	2	0,1		
Total	79,2	10			

Fonte: Autor (2021)

R²: 63,47%

Figura 18: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Sedimentação no Adensamento por FAD com Polímero Catiônico



Fonte: Autor (2021)

Adensamento por FAD: Polímero Aniônico

- Turbidez do Sobrenadante

Tabela 17: Resultados da Regressão da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Aniônico – Adensamento por FAD

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	12,27	1,77	6,92	0,0010
X₁	-0,96	1,09	-0,88	0,4183
X₁²	0,49	1,29	0,38	0,7202
X₂	0,90	1,09	0,83	0,4459
X₂²	-0,24	1,29	-0,18	0,8627
X₁. X₂	-0,37	1,54	-0,24	0,8203

Fonte: Autor (2021)

Sem modelo estatístico que atenda p-valor > 0,10. Valores aderentes à média dos ensaios.

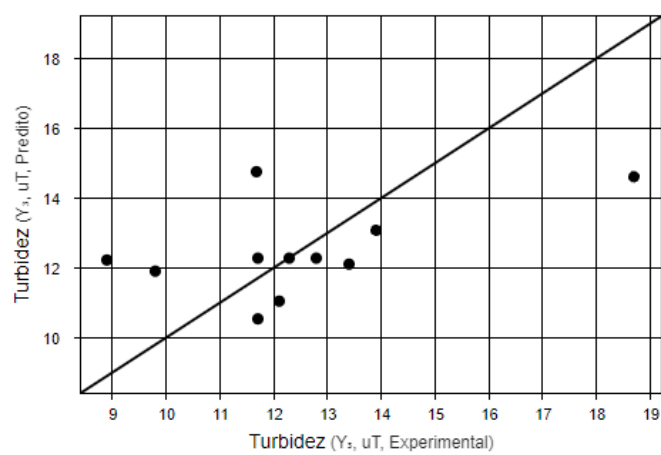
Tabela 18: Análise de Variância da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Aniônico – Adensamento por FAD

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	16,6	5	3,3	0,4	0,86221
Resíduos	47,1	5	9,4		
Falta de Ajuste	46,5	3	15,5	51,1	0,01924
Erro Puro	0,6	2	0,3		
Total	63,7	10			

Fonte: Autor (2021)

R²: 26,00%

Figura 19: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Turbidez do Sobrenadante no Adensamento por FAD com Polímero Aniônico



Fonte: Autor (2021)

- Velocidade de Clarificação

Tabela 19: Resultados da Regressão da Velocidade de Clarificação com Polímero Aniônico – Adensamento por FAD

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	6,54	1,62	4,03	0,0010
X₁	-0,62	0,99	-0,62	0,5597
X₁²	1,33	1,18	1,12	0,3126
X₂	1,57	0,99	1,57	0,1761
X₂²	0,93	1,18	0,79	0,4673
X₁. X₂	0,97	1,41	0,69	0,5218

Fonte: Autor (2021)

Sem modelo estatístico que atenda $p\text{-valor} > 0,10$. Valores aderentes à média dos ensaios.

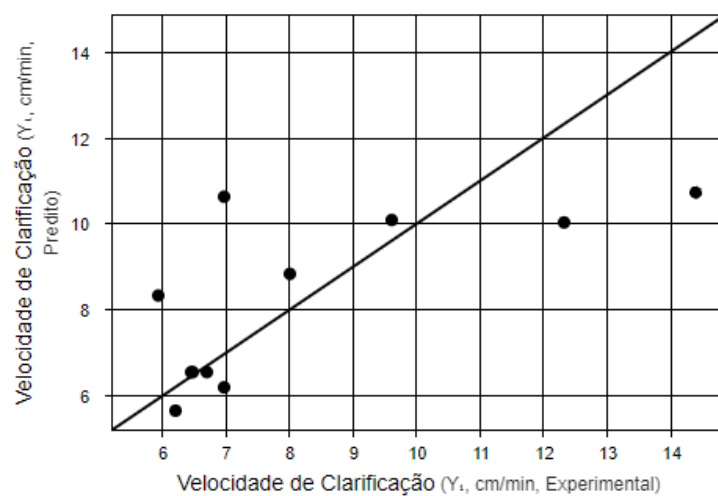
Tabela 20: Análise de Variância da Velocidade de Clarificação com Polímero Aniônico – Adensamento por FAD

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	38,2	5	7,6	1,0	0,51443
Resíduos	39,5	5	7,9		
Falta de Ajuste	39,5	3	13,2	732,4	0,00136
Erro Puro	0,0	2	0,0		
Total	77,7	10			

Fonte: Autor (2021)

R²: 49,15%

Figura 20: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por FAD com Polímero Aniônico



Fonte: Autor (2021)

- Velocidade de Sedimentação

Tabela 21: Resultados da Regressão da Velocidade de Sedimentação com Polímero Aniônico
– Adensamento por FAD

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	6,67	0,43	15,36	0,0000
X₁	-	-	-	-
X₁²	-	-	-	-
X₂	0,99	0,51	1,93	0,0850
X₂²	-	-	-	-
X₁. X₂	-	-	-	-

Fonte: Autor (2021)

Modelo estatístico para p-valor $\leq 0,10$: $Y = 6,67 + 0,99 x_2$

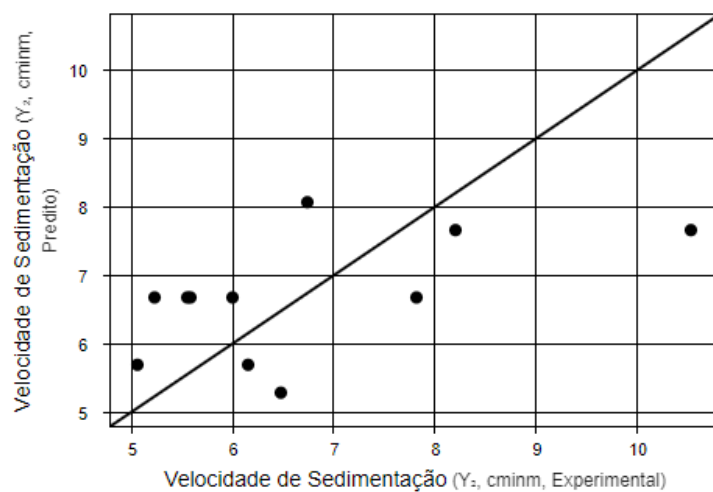
Tabela 22: Análise de Variância da Velocidade de Sedimentação com Polímero Aniônico –
Adensamento por FAD

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	7,8	1	7,8	3,7	0,08503
Resíduos	18,7	9	2,1		
Falta de Ajuste	18,5	7	2,6	41,6	0,02365
Erro Puro	0,1	2	0,1		
Total	26,4	10			

Fonte: Autor (2021)

R²: 29,37%

Figura 21: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Sedimentação no Adensamento por FAD com Polímero Aniônico



Fonte: Autor (2021)

Adensamento por FAD: Polímero Não-Iônico

- Turbidez do Sobrenadante

Tabela 23: Resultados da Regressão da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Não-Iônico
– Adensamento por FAD

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	1,98	0,38	5,21	0,0008
X₁	-2,87	0,32	-8,96	0,0000
X₁²	2,14	0,36	5,88	0,0004
X₂	-	-	-	-
X₂²	-	-	-	-
X₁. X₂	-	-	-	-

Fonte: Autor (2021)

Modelo estatístico para $p\text{-valor} \leq 0,10$: $Y = 1,98 - 2,87 x_1 + 2,14 x_1^2$

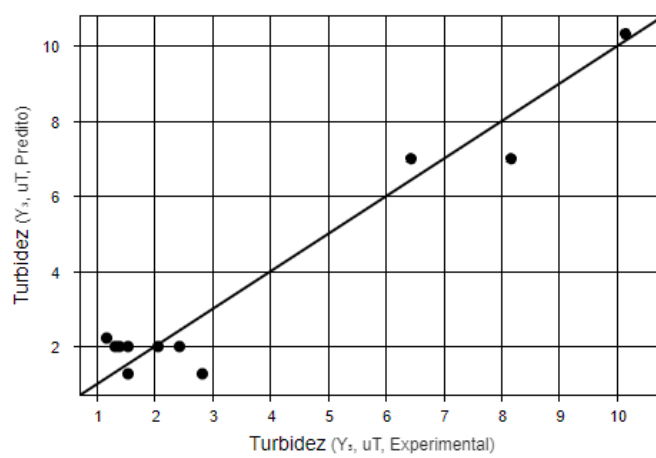
Tabela 24: Análise de Variância da Turbidez do Sobrenadante com Polímero Não-Iônico –
Adensamento por FAD

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	94,0	2	47,0	57,4	0,00002
Resíduos	6,6	8	0,8		
Falta de Ajuste	6,5	6	1,1	86,1	0,01152
Erro Puro	0,0	2	0,0		
Total	100,5	10			

Fonte: Autor (2021)

R²: 93,48%

Figura 22: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Turbidez do Sobrenadante no Adensamento por FAD com Polímero Não-Iônico



Fonte: Autor (2021)

- Velocidade de Clarificação

Tabela 25: Resultados da Regressão da Velocidade de Clarificação com Polímero Não-Iônico
– Adensamento por FAD

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	12,19	1,80	6,78	0,0011
X₁	-0,32	1,10	-0,29	0,7803
X₁²	-0,53	1,31	-0,41	0,7000
X₂	-1,14	1,10	-1,04	0,3473
X₂²	-1,07	1,31	-0,82	0,4496
X₁. X₂	-0,98	1,56	-0,63	0,5571

Fonte: Autor (2021)

Sem modelo estatístico que atenda p-valor > 0,10. Valores aderentes à média dos ensaios.

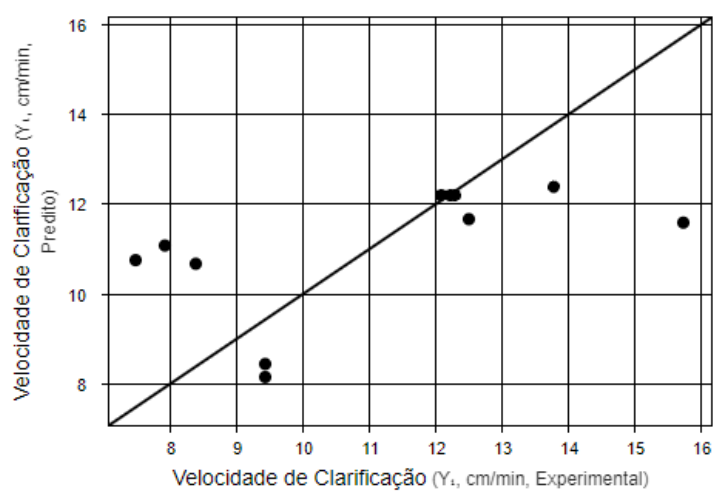
Tabela 26: Análise de Variância da Velocidade de Clarificação com Polímero Não-Iônico –
Adensamento por FAD

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	21,9	5	4,4	0,5	0,79806
Resíduos	48,4	5	9,7		
Falta de Ajuste	48,4	3	16,1	1361,0	0,00073
Erro Puro	0,0	2	0,0		
Total	70,3	10			

Fonte: Autor (2021)

R²: 31,13%

Figura 23: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Clarificação no Adensamento por FAD com Polímero Não-Iônico



Fonte: Autor (2021)

- Velocidade de Sedimentação

Tabela 27: Resultados da Regressão da Velocidade de Sedimentação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por FAD

Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	10,92	1,46	7,47	0,0007
X₁	-0,54	0,90	-0,61	0,5700
X₁²	-1,03	1,07	-0,97	0,3773
X₂	-0,59	0,90	-0,66	0,5361
X₂²	-1,43	1,07	-1,34	0,2388
X₁. X₂	-0,94	1,27	-0,74	0,4904

Fonte: Autor (2021)

Sem modelo estatístico que atenda p-valor > 0,10. Valores aderentes à média dos ensaios.

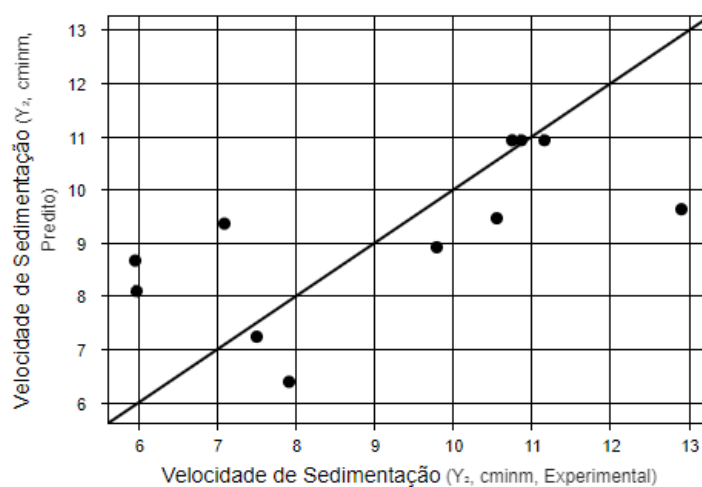
Tabela 28: Análise de Variância da Velocidade de Sedimentação com Polímero Não-Iônico – Adensamento por FAD

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	22,5	5	4,5	0,7	0,64601
Resíduos	32,1	5	6,4		
Falta de Ajuste	32,0	3	10,7	241,7	0,00412
Erro Puro	0,1	2	0,0		
Total	54,6	10			

Fonte: Autor (2021)

R²: 41,27%

Figura 24: Valores Experimentais versus Valores Preditos do modelo matemático para a Velocidade de Sedimentação no Adensamento por FAD com Polímero Não-Iônico



Fonte: Autor (2021)

APÊNDICE B

CURVAS DE ADENSAMENTO DA INTERFACE LODO/ÁGUA

Figura 25: Curva de Adensamento por FAD: Polímero Aniônico

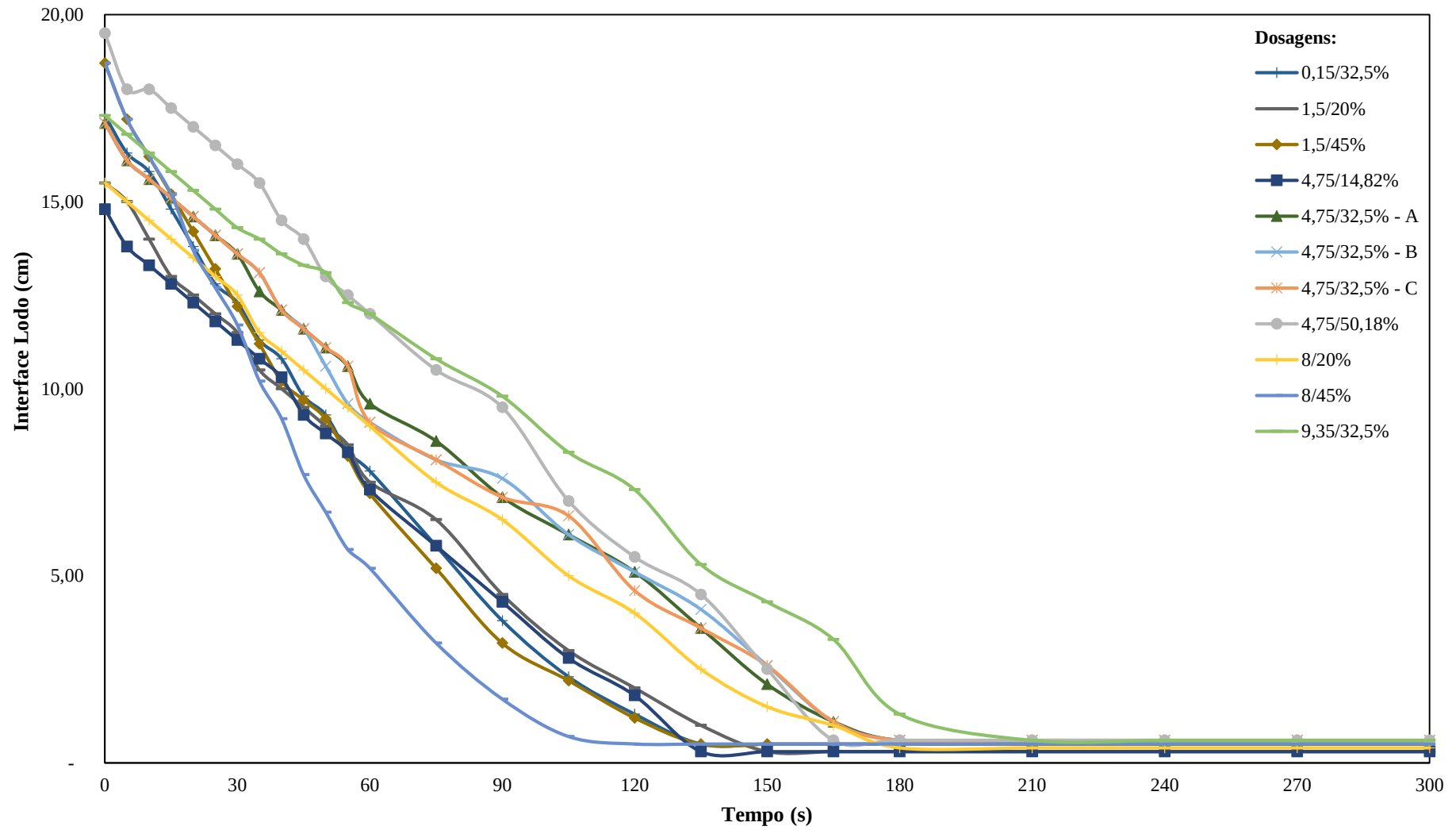


Figura 26: Curva de Adensamento por FAD: Polímero Não-Iônico

