



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
PERNAMBUCO
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO AMBIENTAL - MPGA**

ROMERO CORREIA FREIRE

**ADENSAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA):
UM ESTUDO A PARTIR DO TRATAMENTO POR FLOCO-FLOTAÇÃO DO LODO
GERADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PRESIDENTE CASTELO
BRANCO, PERNAMBUCO- BRASIL**

**RECIFE
2023**

ROMERO CORREIA FREIRE

**ADENSAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA):
UM ESTUDO A PARTIR DO TRATAMENTO POR FLOCO-FLOTAÇÃO DO LODO
GERADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PRESIDENTE CASTELO
BRANCO, PERNAMBUCO- BRASIL**

A dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental, para qualificação como requisito para obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco.

Linha de Pesquisa 2: Tecnologias e Inovações Ambientais

Prof. Dr. Ronaldo Faustino da Silva
Orientador

Prof Dr. Eduardo José Alécio de Oliveira
Coorientador

**RECIFE
2023**

ROMERO CORREIA FREIRE

**ADENSAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA):
UM ESTUDO A PARTIR DO TRATAMENTO POR FLOCO-FLOTAÇÃO DO LODO
GERADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PRESIDENTE CASTELO
BRANCO, PERNAMBUCO- BRASIL**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco para qualificação como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental.

Data da defesa:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Faustino da Silva
Orientador - IFPE

Prof. Dr. Eduardo José Alécio de Oliveira
Coorientador- IFPE

Profa. Dr^a. Renata Maria Caminha Mendes de Oliveira
Carvalho
Examinadora Interna - MPGA

Profa. Dra. Giselaine Maria Gomes de Medeiros
Examinadora Externa - IFPE

Prof. Dr^a. Valderice Pereira Alves Baydum
Examinador Externo – COMPESA/UNICAP

APRESENTAÇÃO

O autor tem 26 anos de atuação na área de saneamento básico e ambiental, na Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) desenvolvendo atividades de: análises químicas – microbiológicas - hidrobiológicas, projetos e adequações de estações de tratamento de água para consumo humano, tratamento de efluentes domésticos, tratamento do LETA, avaliação e controle dos mananciais superficiais e subterrâneos, fiscalização e normatização. Graduado em formação em ciências biológicas (Universidade de Pernambuco), química (universidade federal de pernambuco), tecnologia em gestão ambiental (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco), especialização em vigilância em saúde ambiental (Universidade Federal do Rio De Janeiro), especialização em gerenciamento e elaboração de projetos de recursos hídricos (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará / Agência Nacional das Águas), e gestão em saúde pública (Universidade de Pernambuco). Integrante do Grupo de Trabalho/Estudo da COMPESA que define ações e custos adequados aos padrões de emissão de efluentes líquidos e sólidos (pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de tratamento de resíduos) e da comissão para acompanhamento das intervenções em Fernando de Noronha/PE. No congresso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES) em 2021, apresentou resultados de pesquisa desenvolvida sobre remoção de algas em clarificador de 5 camadas em seixo Clarificador Ascendente em Pedregulho (CAP), sendo premiado com melhor trabalho poster nacional. Participou de diversos cursos de Plano de Segurança da Água (PSA), inclusive Plano Internacional de Segurança da água , e cursos de projetos de estações de tratamento de água e efluentes com vistas ao desenvolvimento de novas tecnologias para tratamento.

Dedico esta dissertação à minha esposa Marlise
Freire pela fé e confiança demonstradas.
Às minhas filhas, Mayra Freire e Maria Clara Freire,
estudantes de engenharia civil, que muito me
ajudaram nos desenhos do Autocad/Revit e nas
traduções de artigos em inglês;
Aos meus pais, Jouvanise Freire e Roberto Freire (in
memorian), que com seus eternos amor e carinho me
apoiaram e deram todo suporte por todos estes anos;
Aos meus amigos, pelo apoio incondicional.
Aos professores, pelo simples fato de estarem
dispostos a ensinar.
Ao meu orientador, pela paciência,
demonstrada
no decorrer deste trabalho.
Enfim, a todos, que de alguma forma tornaram
este caminho mais fácil de ser percorrido.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a DEUS, por ter me mantido na trilha certa durante esta dissertação, com saúde e forças para chegar até o final, em um período de tantas adversidades como foi o da pandemia da COVID-19;

Pela oportunidade de ter participado deste programa do Mestrado Profissional em Gestão Ambiental do IFPE (MPGA), de ter sido um mestrando dessa instituição. Tenho a certeza heraclitiana de que não sou mais o mesmo depois desta imersão neste rio de conhecimentos, um lugar incrível para tornar seu sonho realidade. Aqui não há apenas a qualidade de ensino, mas também o desenvolvimento do ser humano como um profissional completo;

Ao professor Dr^o Ronaldo Faustino, por não se resguardar ao simples papel de orientador de trabalhos de graduação, mestrado e doutorado, sempre disponível, atencioso e orientando tanto no meu crescimento pessoal quanto profissionalmente;

À professora Isabel Cristina Pereira Alves, presidente da Associação Brasileira de Engenharia Ambiental, seção Sergipe, membro do comitê nacional de qualidade da ABES, assessora de gestão da qualidade da Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO), pesquisadora da Universidade Federal de Sergipe e membro técnico do CB/14 - Comitê Brasileiro de Documentação e Informação científica da Associação Brasileira de Normas Técnicas, minha eterna gratidão pelo compartilhamento de seu conhecimento e tempo, pelas suas correções e incentivos pela paciência na revisão técnica da redação dessa dissertação, bem como sua grande amizade.

À Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), pela oportunidade concedida e pela cooperação técnica juntamente com o IFPE e à disponibilização de toda estrutura necessária para realização dos experimentos;

À Dr^a Valderice Alves, gerente de controle de qualidade da COMPESA, minha mentora pelo núcleo de inovação da COMPESA, e grande pesquisadora, pelo incentivo pela ajuda incondicional e incalculável nos mais diversos momentos, e grandes debates sobre os problemas enfrentados no tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de água (LETA) e as possíveis soluções;

À coordenadora da CLT/GQL/COMPESA, Andreia Regis, egressa do MPGA, que muito me incentivou a fazer a seleção do mestrado, mesmo com a intensa rotina diária não mediu esforços para atendimento às minhas solicitações das análises físico-químicas, microbiológicas e hidrobiológicas, que dão base a esta pesquisa;

Ao professor Dr^o Fábio Portella, especialista em qualidade da COMPESA, pela dedicação, incentivo, pela sua especial atenção e colaboração para o bom desenvolvimento deste trabalho, pela dedicação e compromisso com a qualidade.

A todos professores do MPGA, professoras Marília, Rogéria, Sofia, Renata que não mediram esforços para nos auxiliar no período da pandemia, foram diversas gravações, videoaulas, chamadas de vídeo, de voz, mensagens de texto e ligações, para garantir o direito à aprendizagem. Mas do que nunca, é preciso valorizar o trabalho de cada um, que apesar de todas as dificuldades do momento recorreram a diferentes ferramentas para continuarmos tendo acesso ao conhecimento;

À prof^a Dr^a Karyna Chaves Lucena do Instituto Federal do Ceará (IFCE), minha orientadora na pós-graduação do curso de gerenciamento e elaboração de projetos em recursos hídricos da ANA/IFCE, grande incentivadora e me orientou no pré projeto de pesquisa para este mestrado, vem dando grandes contribuições para elaboração dessa dissertação;

Aos professores Luiz Di Bernardo, Paulo Voltan, Ângela Di Bernardo pelas orientações nos cursos de LETA, e grandes discussões e orientações com relação ao tema;

À professora Luiza Campos da Universidade de Londres, pelas grandes contribuições e

orientações com relação ao tema LETA/flotação por ar dissolvido/polímeros como modificadores de superfície;

Ao engenheiro Gustavo Rafael Collere Posseti, gerente de pesquisa e inovação da Companhia Paranaense de Saneamento (SANEPAR), pelas horas de conversas e orientações, e dos vários livros publicados pela SANEPAR que me enviou para ser base dessa dissertação.

Ao professor Cleverson Andreoli, grande professor e pesquisador na área de resíduos gerados em estações de tratamento de água e efluentes domésticos e industriais, pelos grandes ensinamentos e orientações no tratamento desses resíduos.

Aos engenheiros civis Marcel Rafael Frazão Arruda Diniz e Bruna Veras de Lima, que deram todo suporte teórico e prático operacional para formentar este projeto, e por toda contribuição nas intervenções realizadas na instalação da unidade de tratamento de resíduos piloto e confecção de demais equipamentos. Registo aqui uma profunda admiração pessoal e profissional a esses verdadeiros profissionais em seus ofícios;

Aos colegas e amigos do Mestrado em Gestão Ambiental (MPGA) do IFPE, pelo carinho e companheirismo, em particular a Débora, Magaly, Cláudia, Dominique, Wolney muito obrigado;

A Marcus Bernardo e Amanda Tavares da Coordenação do MPGA, pelo grande suporte aos mestrandos, sempre orientando, e com enorme paciência;

À minha esposa, Marlise Freire, pelo apoio e amor incondicional, por ser meu sustento, sempre me dando forças, torcendo por mim e providenciando tudo para que nada me faltasse. Amo você;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê (Arthur Schopenhauer).

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivos apresentar o estudo, desenvolvimento de um projeto e ensaios de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETEF) piloto, para o tratamento de resíduos gerados na estação de tratamento Presidente Castelo Branco-PE. A unidade de estudo foi um floco-flotador (FFAD), onde se tem a associação das tecnologias de floculadores em bandejas seguido de flotação por ar dissolvido (FAD), com aplicação do Polydadmac, polímero de alta carga de baixo peso molecular. No estudo o condicionante químico Polydadmac teve a função de modificador de superfície. A água aduzida para tratamento na ETATapacurá / Presidente Castelo Branco tem problemas de eutrofização, onde a presença de algas nos resíduos gerados dificultam a extração da água do lodo. Como consequência não se tem uma boa performance na etapa de adensamento e desagüe, tornando esse tratamento ineficiente. No Brasil, grande parte das ETA's lançam seus resíduos indiscriminadamente nos corpos hídricos. A coibição desta prática é evidenciada através de políticas públicas de órgãos como a ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico/Agência Nacional das Águas), e leis existentes no Brasil, como a Lei de Crimes Ambientais (Lei 9.605/1998). Portanto é necessária a adequação dos sistemas de saneamento quanto ao tratamento e a destinação adequada dos resíduos produzidos pelas estações de tratamento de água. Pelos motivos elencados acima, foi desenvolvida essa pesquisa com a finalidade de se ter um tratamento eficaz para o LETA gerado na ETA Tapacurá / Presidente Castelo Branco, Recife-PE. No projeto da unidade piloto foram realizados ensaios de bancada para determinação dos parâmetros aplicados no projeto. De posse dos resultados foi dimensionada a unidade de tratamento para ser aplicada na etapa de adensamento de lodo, onde foram realizados 6 ensaios na ETEF piloto para avaliação da qualidade do clarificado e do lodo flotado. Os melhores resultados encontrados tiveram como variáveis: a dosagem de polímero de 3 pol g / kg SST, taxa de recirculação de 40%, gradiente de 100 s^{-1} , com remoção de: turbidez 98%, cor 99,03%, SST 99,97%, 99,92% no alumínio, 99,92% no ferro, 99,91% no manganês, 97,44% na DQO 86,4% e no DBO 95,62%. Observamos que na aplicação de microbolhas modificadas por polímero, as interações polímero-bolha-resíduo revestem e tem a função de gerar microbolhas carregadas positivamente. Os resultados obtidos demonstraram que a combinação de tecnologias (floculador em bandejas + flotação por ar dissolvido-FAD) com a aplicação do polímero catiônico (Polydadmac), ofereceram uma qualidade de efluente, e se enquadram na legislação vigente para padrões de lançamento em corpos hídricos para padrões de lançamento em corpos hídricos, e também aos padrões preconizados para recirculação na unidade de tratamento de água para consumo humano; o resíduo adensado também atendeu aos percentuais requeridos para o teor de sólidos no lodo flotado.

Palavras-chave: Flotação por ar dissolvido. Floculação em bandejas. Algas. Polydadmac.

ABSTRACT

The present work aims to present the study, development of a project and tests of a pilot Effluent Treatment Station (ETEF), for the treatment of waste generated at the Presidente Castelo Branco-PE treatment station. The study unit was a floc-flotter (FFAD), which combines flocculator technologies in trays followed by solvent air flotation (FAD), with the application of Polydadmac, a high-load polymer of low molecular weight. The study of the chemical conditioner Polydadmac had the function of a surface modifier. The water supplied for treatment at the Presidente Castelo Branco WTP has eutrophication problems, where the presence of algae in the waste generated makes it difficult to ingest the sludge water. Consequently, there is not a good performance in the consolidation and drainage stages, making the treatment inefficient. In Brazil, most WTPs throw their waste indiscriminately into water bodies. The curbing of this practice is evidenced through public policies of bodies such as the ANA (National Water and Basic Sanitation Agency National Water Agency), and existing laws in Brazil, such as the Environmental Crimes Law (Law 9.605/1998). Therefore, it is necessary to adapt sanitation systems in terms of treatment and proper disposal of waste produced by water treatment plants. For the reasons listed above, this research was developed with the aim of having an effective treatment for the LETA generated at the ETA Tapacurá / Presidente Castelo Branco, Recife-PE. In the pilot unit project, bench tests were carried out to determine the parameters applied in the project, such as. With the results in hand, the treatment unit was dimensioned to be applied in the sludge consolidation stage, where 6 tests were carried out in the pilot ETEF to evaluate the quality of the clarified and the quality of the floated sludge. The best results found had as variables: polymer dosage of 3 in g / kg SST, recirculation rate of 40%, gradient of 100 s⁻¹, with removal of: turbidity 98%, color 99.03%, SST 99.97%, 99.92% aluminum, 99.92% iron, 99.91% manganese, 97.44% COD 86.4% and BOD 95.62%. It is observed that in the application of polymer-modified microbubbles, the polymer-bubble-residue interactions coat and functionalize to generate positively charged microbubbles. The results showed that the combination of technologies (tray flocculator dissolved air flotation - FAD) with application of cationic polymer (Polydadmac), offered quality to the effluent, and adapted to the current legislation for standards of release in water bodies, for standards of release in water bodies, and also to the recommended standards for recirculation in the water treatment plant for human consumption. The densified residue also met the percentages required for the solids content in the floated sludge.

Keywords: Flotation by dissolved air. Flocculation in trays. Algae. Polydadmac.Sludge.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tecnologias disponíveis para do tratamento de água.....	23
Figura 2 – Concepção ciclo completo para tratamento de água: Etapas do tratamento de água em estações convencionais	24
Figura 3 – Tecnologias de tratamento de água com e sem mecanismo de coagulação.....	25
Figura 4 – Floculadores em bandeja.....	27
Figura 5 – Sistema de flotação por ar dissolvido FAD – Zona de flotação.....	28
Figura 6 - Sistema de flotação por ar dissolvido FAD – Formação do manto de lodo	29
Figura 7 – Modificação da superfície da microbolha na etapa de flotação	30
Figura 8 – Torre de saturação em serpentina.....	31
Figura 9 – Lodo gerado na Estação de Tratamento de Água (LETA) gerado em e decantadores (A) filtros	36
Figura 10 – Lançamento do Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) em corpos de água, causando alterações nas suas características físico-químicas	40
Figura 11 – Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) gerado em decantador convencional com remoção hidráulica	41
Figura 12 – Tratamento integrado de unidades de tratamento de água e de resíduos de ETA	42
Figura 13 – Presença de água no LETA	44
Figura 14 – ETA Tapacurá – Recife/PE.....	54
Figura 15 – Decantadores da ETA Tapacurá – Recife/PE	55
Figura 16 – Local da implantação da unidade de Floco-flotação por ar dissolvido na Estação de Tratamento de Água (ETA) Tapacurá (Pernambuco, Brasil)	57
Figura 17 - Etapas da pesquisa	58
Figura 18 - Conjunto de equipamentos para ensaio de Reistência Específica	63
Figura 19 - Jarros calibrados para dispersão uniforme da água saturada	64
Figura 20 - Jarros calibrados para	64
Figura 21 - Gradiente de velocidade do Flotatest em função da velocidade do impulsor nas temperaturas de 4°C e 27°C.	66
Figura 22 - Regulador tipo agulha.....	72
Figura 23 - Equipamentos para dosagem de produtos químicos na entrada do floculador em bandejas do FFAD.....	77
Figura 24 – Acompanhamento da densidade de cianobactérias nas águas da Barragem Tapacurá no período de janeiro/2021 a abril/2022.....	79
Figura 25 - Localização geográfica da barragem Tapacurá (Pernambuco, Brasil	80
Figura 26 – Municípios de Pernambuco que se localizam nas margens da Barragem Tapacurá	81
Figura 27 – Tipos de solos da bacia hidrográfica da Barragem Tapacurá	81
Figura 28 – Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da Barragem Tapacurá	82
Figura 29 - Médias mensais da precipitação pluviométrica	83
Figura 30 - Precipitação Total	84
Figura 31 – Fluxograma básico para tratamento de lodo gerado em Estações de Tratamento de Água.....	87
Figura 32 – Balanço de massa final para estimativa da produção de lodo nas diversas etapas da produção em uma Estação de Tratamento de Água. A) durante o período chuvoso; B) durante o período de estiagem	87
Figura 33 – Gráficos de efeitos principais indicando percentual de remoção de turbidez.....	97
Figura 34 – Gráficos de efeitos principais indicando percentual de remoção de sólidos solúveis totais	97

Figura 35 – Gráficos de interação indicando percentual de remoção de turbidez	99
Figura 36 – Gráficos de interação indicando percentual de remoção de sólidos suspensos totais	99
Figura 37 – Flotação – Zona de contato	108
Figura 38 – Interface – Zona de separação.....	108
Figura 39 – Resíduo gerado na Estação de Tratamento de Água Tapacurá (1) e Água clarificada pós tratamento na unidade piloto (2)	108
Figura 40 – Lodo após adensamento no Floco-flotador de ar dissolvido piloto, utilizando pressão de operação de 5,5 atm e dosagem de polímero de 3,0 g pol/ kg SST	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constantes da Lei de Henry para o ar.....	32
Tabela 2 - Gradiente de velocidade e temperatura dos ensaios de tratabilidade em Flotatest.....	65
Tabela 3 - Temperaturas normais para o município de São Lourenço da Mata- PE, em °C... ..	84
Tabela 4 - Caracterização físico-química e bacteriológica da água da lavagem dos filtros e descarga dos decantadores da Estação de Tratamento de Água Tapacurá em 2021	91
Tabela 5 - Resistência específica do Lodo da Estação de Tratamento de Água de Tapacurá, considerando aplicação de diferentes polímeros	93
Tabela 6 - Ensaio de tratabilidade do Lodo da Estação de Tratamento Tapacurá com utilização do polímero POLYDADMAC	96
Tabela 7 - Determinação da taxa de aplicação superficial, considerando diferentes valores de velocidade ascensional, cor, turbidez e sólidos suspensos totais	100
Tabela 8 – Volume de ar precipitado em função da pressão manométrica	100
Tabela 9 - Relação Ar / sólidos (A/S).....	101
Tabela 10 - Dados do projeto Floco-Flotador por Ar Dissolvido (FFAD).....	102
Tabela 11 - Resultados de turbidez, cor, sólidos solúveis totais, concentrações de alumínio, ferro, manganês, Demanda Química de Oxigênio e Demanda Bioquímica de Oxigênio Dissolvido e teor de sólidos no lodo flotado dos ensaios no Floco-floculador de Ar com o lodo da Estação de Tratamento de Água de Tapacurá Tratamento de Água de Tapacurá	106
Tabela 12 - Resultados de turbidez, cor, sólidos solúveis totais, concentrações de alumínio, ferro, manganês, Demanda Química de Oxigênio e Demanda Bioquímica de Oxigênio e teor de sólidos no lodo flotado dos ensaios no Floco-floculador de Ar Dissolvido, utilizando pressão de 5,5	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Remoção de microrganismos e turbidez da água potável	34
Quadro 2 - Tipos de mananciais e produção de lodo	37
Quadro 3 - Características típicas de lodo de sulfato de alumínio	38
Quadro 4 - Características típicas de lodo de sais de ferro	38
Quadro 5 – Métodos para tratamento do LETA.....	42
Quadro 6 - Valores de teor de sólidos para diferentes tecnologias de desaguamento	47
Quadro 7 - Parâmetros de projeto de adensadores por flotação (AWWA,1999; AWWA, ASCE 1998).....	48
Quadro 8 - Parâmetros de projeto de adensadores por gravidade (AWWA,1999; AWWA, ASCE 1998).....	48
Quadro 9 - Análises realizadas com o lodo da Estação de Tratamento de Água Presidente Castelo Branco, com seus respectivos métodos e equipamentos (APHA, 2017).....	62
Quadro 10 – Acompanhamento das análises hidrológicas da Barragem de Tapacurá / abril 2021	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALAF	Água da Lavagem dos filtros
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DD	Descarga dos decantadores
ETEF	Estação de Tratamento de efluentes
ETA	Estação de Tratamento de Água
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
FFAD	Floco- flotação por ar dissolvido
MBs	Microbolhas
PSA	Plano de Segurança da Água
LETA	Lodo de Estação de Tratamento de Água
POLYDADMAC	Cloreto de polidialidimetilamônio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	21
2.1	OBJETIVO GERAL.....	21
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3	REVISÃO DE LITERATURA	22
3.1	TRATAMENTO DE ÁGUA	22
3.2	TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA	22
3.3	PROCESSOS E OPERAÇÕES NO TRATAMENTO DE ÁGUA	24
3.4	LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA).....	34
3.4.1	CARACTERIZAÇÃO E ASPECTOS SANITÁRIOS DO LETA.....	37
3.4.2	IMPACTO POTENCIAL DO LETA NOS CORPOS HÍDRICOS.....	39
3.4.3	TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DO LETA.....	41
3.4.4	PANORAMA DA GESTÃO AMBIENTAL E DESTINAÇÃO FINAL DO LETA NO BRASIL E EM PERNAMBUCO	48
3.5	ETA TAPACURÁ, OPERADA PELA COMPESA	53
4	METODOLOGIA	55
4.1	DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE PILOTO	55
4.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	57
	ETAPA 1 - LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E DOCUMENTAL, E LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA	58
A)	ETAPA 2 – QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME DE ÁGUA UTILIZADO E DE LODO GERADO NAS OPERAÇÕES DE LAVAGEM DOS FILTROS E DESCARGAS DOS DECANTADORES.....	59
C)	ETAPA 4 – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA ESPECÍFICA (RE) DO LETA E ENSAIOS DE TRATABILIDADE PARA DEFINIÇÃO DA APLICAÇÃO DO POLÍMERO, DEFINIÇÃO DOS GRADIENTES DE FLOCULAÇÃO E TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL (TAS), ANÁLISE DO TEOR DE SÓLIDO ADENSADO.....	62
D)	ETAPA 5 – VERIFICAR OS PARÂMETROS DO PROJETO MAIS EFICIENTES NA REDUÇÃO DAS VARIÁVEIS DE QUALIDADE DO LETA.	66
E)	ETAPA 6 – VERIFICAR SE AS VARIÁVEIS DE QUALIDADE DA ÁGUA CLARIFICADA ESTÃO DE ACORDO COM OS PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES OU INTEGRAÇÃO Á AGUA BRUTA NO INÍCIO DA ETA CONFORME RESOLUÇÃO CONAMA Nº 430/2011.	77
F)	ETAPA 7 – AVALIAR AS POSSIBILIDADES DE DISPOSIÇÃO FINAL DO LETA ORIUNDO DA ETA PRESIDENTE CASTELLO BRANCO.	77
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
5.1	A BACIA HIDROGRÁFICA E A UNIDADE PILOTO NA ETA TAPACURÁ	78

5.1.1	CARACTERIZACAO DA BACIA HIDROGRAFICA DE TAPACURA	78
5.1.2	ETAPA 1B - LOCALIZAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DA BARRAGEM TAPACURÁ.....	79
5.1.3	DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS.....	82
5.1.3.1	CLIMATOLOGIA	82
5.1.3.2	TEMPERATURA.....	84
5.2	VOLUME DE ÁGUA UTILIZADO E DO LODO GERADO NAS OPERAÇÕES DE LAVAGEM DOS FILTROS E DESCARGAS DOS DECANTADORES DA ETA TAPACURÁ.....	84
5.2.1	VOLUME DE ÁGUA UTILIZADO NA LAVAGEM DIÁRIA DOS FILTROS E DESCARGA DOS DECANTADORES.	84
5.2.2	QUANTIFICAÇÃO DO LODO GERADO NAS LAVAGENS DE FILTROS E DESCARGA DOS DECANTADORES DA ETA TAPACURÁ.....	85
5.2.3	CARACTERIZAÇÃO DO LETA GERADO NA ETA TAPACURÁ.	88
5.2.4	DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA ESPECÍFICA (RE) DO LETA E ENSAIOS DE TRATABILIDADE PARA DEFINIÇÃO DA APLICAÇÃO DO POLÍMERO, DEFINIÇÃO DOS GRADIENTES DE FLOCULAÇÃO E TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL (TAS).....	92
5.2.5	DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA ESPECÍFICA (RE) DO LETA.....	92
5.2.6	ENSAIOS DE TRATABILIDADE PARA DEFINIÇÃO DA APLICAÇÃO DO POLÍMERO, DEFINIÇÃO DOS GRADIENTES DE FLOCULAÇÃO E TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL (TAS). .	93
5.3	RESULTADOS ETAPA 5 - VERIFICAÇÃO OS PARÂMETROS DO PROJETO MAIS EFICIENTES NA REDUÇÃO DAS VARIÁVEIS DE QUALIDADE DO LETA.	100
5.4	ETAPA 6 – VERIFICAÇÃO SE AS VARIÁVEIS DE QUALIDADE DA ÁGUA CLARIFICADA ESTÃO DE ACORDO COM OS PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES OU INTEGRAÇÃO Á AGUA BRUTA NO INICIO DA ETA CONFORME RESOLUÇÃO CONAMA Nº 430/2011.	109
	REFERÊNCIAS.....	118

1 INTRODUÇÃO

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população brasileira aumentou de 173.448.346 habitantes em 2000 para 214.040.359 habitantes em 2021 (IBGE, 2021). Em virtude desse crescimento populacional, a demanda de água para abastecimento público torna-se cada vez maior e, em paralelo, o maior volume de esgotos gerados pela população pode resultar na deterioração da qualidade da água bruta, caso o lançamento seja realizado sem um tratamento prévio (BOTERO et al., 2009).

Para produção de água potável a partir de água bruta, vários processos são disponíveis, tais como: coagulação, floculação, decantação e filtração. Durante o tratamento, diversos produtos químicos são adicionados para garantir a remoção das impurezas da água. Deste modo, a redução da qualidade das águas brutas pode acarretar o incremento no uso de produtos químicos e, posteriormente, maior geração de resíduos, principalmente nos decantadores e nas águas de lavagem dos filtros, sendo denominados Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2007).

Diversas metodologias estão disponíveis para o tratamento de água, destacando-se as de ciclo completo, compactas, ultrafiltração, dentre outras. Em todas, ocorre o uso de produtos químicos, em diferentes proporções, levando à produção de lodo proveniente destes compostos. Dentre estas concepções disponíveis, as Estações de Tratamento de Água (ETA) de ciclo completo, que compreendem as etapas de coagulação, floculação, sedimentação, filtração estão geralmente associadas ao maior consumo de produtos químicos e, conseqüentemente, maior geração de resíduos, que compõem o LETA, em virtude, principalmente, do emprego de mecanismos de coagulação por varredura, em que as dosagens de coagulantes são relativamente altas, acarretando excessos de precipitados de alumínio ou ferro e aglutinação das impurezas (CAVAZZANA; MATSUMOTO; LIBÂNIO, 2008).

Os LETA são classificados, de acordo com a Norma Brasileira (NBR) 10.004 (ABNT, 2004), em resíduos sólidos e semisólidos e na Lei Federal nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, estão estabelecidas as diretrizes nacionais para o manejo adequado desse lodo, com vistas à proteção da saúde pública e do meio ambiente (BRASIL, 2007)

Atualmente, há uma grande preocupação com o LETA, permitindo o incremento de pesquisas destinadas, principalmente, ao tratamento desse resíduo, bem como sua disposição final (FEITOSA; CONSONI, 2008), essas preocupações têm impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis para o tratamento e manejo do lodo de ETA em nível internacional (FERRARIS et al., 2018), em nível nacional as concessionárias de saneamento tem desenvolvido pesquisa para aprimorar tecnologias que sejam eficientes no tratamento desses resíduos (VIANNA, 2019). . Esforços estão sendo feitos para

melhorar a gestão do lodo, minimizar impactos ambientais e promover a recuperação de recursos. Esses trabalhos são motivados, majoritariamente, pelo questionamento dos órgãos ambientais em virtude dos riscos à saúde pública e meio ambiente ocasionados por estes materiais, assim como pela evolução dos conceitos de qualidade dentro das próprias empresas de saneamento (RITCHER, 2001).

As tecnologias que vem sendo utilizadas no tratamento destes resíduos são antigas, e foram projetadas para águas em condições totalmente diferente das atuais, tornando complexa a remoção de compostos e microrganismos destes lodos (RITCHER, 2001).

Dentre as concepções disponíveis para tratamento de água na Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), as maiores unidades são de ciclo completo, das 248 Estações de Tratamento de Água (ETA) para consumo humano existentes, 73 são de ciclo completo, que compreendem as etapas de coagulação, floculação, decantação/flotação e filtração ou seja, 29,4%. Na tecnologia de tratamento de água por ciclo completo tem as seguintes etapas: coagulação, floculação, sedimentação, filtração). Esta tecnologia é, a mais indicada para águas com turbidez até 1500 uT (águas com turbidez superiores precisariam de pré sedimentadores), e utilizam o mecanismo de coagulação de varredura, em que as dosagens de coagulantes e pH são relativamente altas, acarretando excessos de precipitados de alumínio ou ferro, e causando a aglutinação das impurezas. Portanto, desta forma, esta tecnologia está geralmente associada ao maior consumo de produtos químicos e, conseqüentemente, maior, geração de resíduos, que é constituídos por sólidos e precipitados químicos, que compõem uma massa de partículas orgânicas e inorgânicas, densa e viscosa, denominado lodo da estação de tratamento o LETA; este lodo necessita de tratamento específico para posterior disposição final no ambiente (ANDREOLI, 2013).

O despejo do lodo sem tratamento adequado prejudica os mananciais superficiais, principalmente aqueles com menor profundidade e volume. A carga poluidora lançada por uma cidade compromete a qualidade da água captada à jusante por outro município, promovendo efeitos em cascata de poluição. Durante a estiagem, a situação é agravada, pois os reduzidos volumes nos mananciais acarretam uma maior concentração dos poluentes. Por outro lado, a recirculação dos efluentes da ETA sem nenhum tipo de recuperação ou tratamento ineficiente pode promover um aumento na quantidade de sólidos prejudicando o próprio tratamento da água quando recirculado, e gerando riscos de contaminação microbiológicas e químicas (SCALIZE *et al.*, 2014). Tradicionalmente, as ETAs sempre visaram à produção de água com qualidade, para atingir os padrões de potabilidade, dispensando maiores preocupações com os resíduos gerados, relativamente dando pouca atenção ao tratamento de lodos gerados

(VIANNA, 2019).

O lançamento de LETA no corpo receptor ou a sua recirculação sem o devido tratamento para o início do processo podem gerar. Na prática, algumas concessionárias de saneamento devolvem os resíduos ao corpo receptor sem tratamento ou recirculam para o início da ETA. Essas alternativas geram não apenas impactos ambientais, mas também afetam à saúde humana, devido à grande quantidade de metais pesados e patógenos, principalmente cistos de *Giardia spp* e oocistos de *Cryptosporidium spp* que, devido a prática de recirculação de LETA pode constituir introdução de perigos no processo de tratamento da água e implicar risco à saúde da população consumidora. Isso porque, como a filtração representa a principal etapa do tratamento responsável pela remoção de protozoários e considerada barreira sanitária da estação de tratamento, muitas vezes contém concentrações mais elevadas de cistos ou oocistos do que a própria água bruta (AB). Adicionalmente, em decorrência das suas dimensões reduzidas e da forma encistada, os protozoários, principalmente os oocistos de *Cryptosporidium spp.*, podem passar pelos filtros, além de serem pouco suscetíveis às doses de cloro utilizadas nas ETA (FERREIRA FILHO, 2020).

Se não houver tratamento do LETA, os corpos receptores por sua vez, são significativamente poluídos e contaminados, além de apresentarem aspetos visuais deploráveis. O lançamento indiscriminado de LETA nos corpos de água, pode causar limitação da transparência, ocasionando impactos negativos na biota do ecossistema aquático, devido, principalmente, ao aumento da concentração de sólidos solúveis totais (SST) e redução da produção primária. Estes cenários podem limitar ou até mesmo impedir o uso do corpo receptor como fonte de desseedentação de animais ou como captação para abastecimento de comunidades localizadas à jusante do ponto de lançamento.

Portanto, devido à sua composição química e biológica, este lodo necessita de tratamento específico para posterior disposição final no ambiente ou recirculação ao início do tratamento (FERREIRA FILHO, 2020), evitando comprometimento do funcionamento das ETA's, bem como impactos negativos no meio ambiente ou à qualidade da água que está sendo produzida (ANDREOLI, 2013).

É importante salientar que a Agenda 2030 da ONU para o desenvolvimento sustentável aponta, nos seus objetivos 06 e 12 respectivamente, assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos, e a necessidade do consumo e produção responsáveis. Vale ressaltar também que a economia circular, e nela incluído o reuso, é fundamental para o desenvolvimento sustentável e para o atingir o Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) supracitado. Já para que o tratamento de água possa ser

realizado, são gerados grandes volumes de lodo, que na maioria dos casos é visto apenas como “resíduos” e lançados nos aterros. Porém, cada vez mais esses aterros estão se esgotando, essa falta de espaços para o descarte e ao aumento dos custos para realizá-lo tem forçados empresas de saneamento e indústrias a procurarem meios alternativos de aproveitamento desses resíduos. Essa necessidade tem sido reforçada ainda mais por causa da força que o conceito ESG (Environmental, Social and Governance) tem dado as empresas, essa sigla refere-se a e princípios de negócios ambientais, sociais e de governança, gerando ações que estão se tornando mais comuns. Para isto, é fundamental o emprego de tecnologias eficientes para tratar o LETA. Das técnicas disponíveis, pode-se citar a técnica de flotação por ar dissolvido (FAD), que é capaz de remover metais pesados, bem como as formas parasitárias no sobrenadantes e/ou sedimentado, durante o tratamento, gerando um material inerte que pode ser lançado nos corpos receptores (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Os flocos leves gerados na FAD ocorrem principalmente em águas com elevadas concentrações de algas, podendo originar água com valores elevados de cor, em virtude da presença de flocos leves durante o tratamento (ANDREOLI, 2013; CHAVES; SALES; NETO JOSÉ, 2015). Atualmente a associação de tecnologias vem se tornando uma grande alternativa no tratamento de água, efluentes domésticos e LETA, o emprego da associação da tecnologia de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) com a aplicação da floculação em bandejas perfuradas na etapa de tratamento é considerada uma inovação tecnológica e pode elevar a eficiência de tratamento do LETA, sendo, portanto, a metodologia de escolha para o desenvolvimento deste trabalho.

A associação de tecnologias no tratamento do LETA é de extrema importância para melhorar a eficiência e sustentabilidade do processo de tratamento, bem como para reduzir os impactos negativos ambientais associados à disposição inadequada do lodo, em muitos países, existem regulamentos e normas específicas para o tratamento, transporte, armazenamento e disposição do lodo (BESSA; GOMES; SOUZA, 2021). A associação de tecnologias pode ajudar a atender a essas regulamentações, garantindo que o lodo de ETA seja tratado de maneira adequada, segura e ambientalmente responsável, além de trazer flexibilidade e adaptabilidade ao processo de tratamento.

Nem sempre uma única tecnologia é capaz de atender a todas as necessidades e condições específicas. A associação de diferentes tecnologias permite a adaptação do tratamento às características locais, como a quantidade e qualidade do lodo gerado, a disponibilidade de recursos e a infraestrutura existente. Isso permite uma abordagem mais flexível e personalizada, resultando em um tratamento mais eficiente e adequado ao contexto específico (PAMPLONA; MELO; FARIAS, 2018).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o adensamento de lodo de estação de tratamento de água (LETA), a partir do tratamento por floco-flotação do lodo gerado na Estação De Tratamento De Água Presidente Castelo Branco, Pernambuco - Brasil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar o volume gasto nas lavagens de filtros e descargas dos decantadores da ETA Tapacurá.
- Caracterizar e quantificar o LETA gerado na ETA Tapacurá;
- Determinar a resistência específica do LETA, as melhores dosagens de polydamac, auxiliares de coagulação e gradientes de floculação a serem utilizados no tratamento do lodo, através de ensaios no equipamento flotatest;
- Definir parâmetros do projeto a partir dos ensaios de bancada;
- Testar o processo de adensamento do LETA a partir do floco-flotador piloto e avaliar o teor de de sólidos no lodo adensando.
- Verificar os parâmetros de projeto mais eficientes na redução das variáveis de qualidade do LETA;
- Verificar se as variáveis de qualidade da água clarificada estão de acordo com os padrões de lançamento de efluentes ou integração á agua bruta no inicio da ETA conforme Resolução CONAMA nº 430/2011;
- Avaliar as possibilidades para disposição final do lodo oriundo da ETA Presidente Castelo Branco.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Nessa revisão bibliográfica foram abordadas as tecnologias de tratamento de água, geração do LETA, e os tratamentos utilizados no tratamento para o LETA, enfatizando as etapas e a importância da avaliação de cada etapa para o tratamento eficiente. Também foi realizada uma abordagem na caracterização, os impactos ambientais, os aspectos sanitários, as legislações pertinentes a esse resíduo produzido nas estações de tratamento de água, destinação final e um panorama da gestão do LETA no Brasil e em Pernambuco.

3.1 TRATAMENTO DE ÁGUA

O tratamento de água para consumo humano é conceituado como o conjunto de processos e operações realizados com a finalidade de adequar as características físico-químicas e biológicas da água bruta, isto é, como é encontrada no curso d'água, com padrão organolepticamente agradável e que não ofereça riscos à saúde humana. O padrão é determinado por órgãos competentes por intermédio de legislação específica. No Brasil, a qualidade da água para consumo humano é especificada na Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 (VIANNA, 2019).

3.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Independente de qualquer outra variável, a qualidade da água bruta desempenha papel fundamental para pré-seleção das tecnologias de tratamento tecnicamente factíveis. É evidente que as águas provenientes dessas fontes poderão ser tratadas por diferentes tecnologias e, certamente, irão gerar lodos em quantidade e qualidade totalmente distintas por este motivo a necessidade de sua caracterização apropriada (RICHTER, 2001).

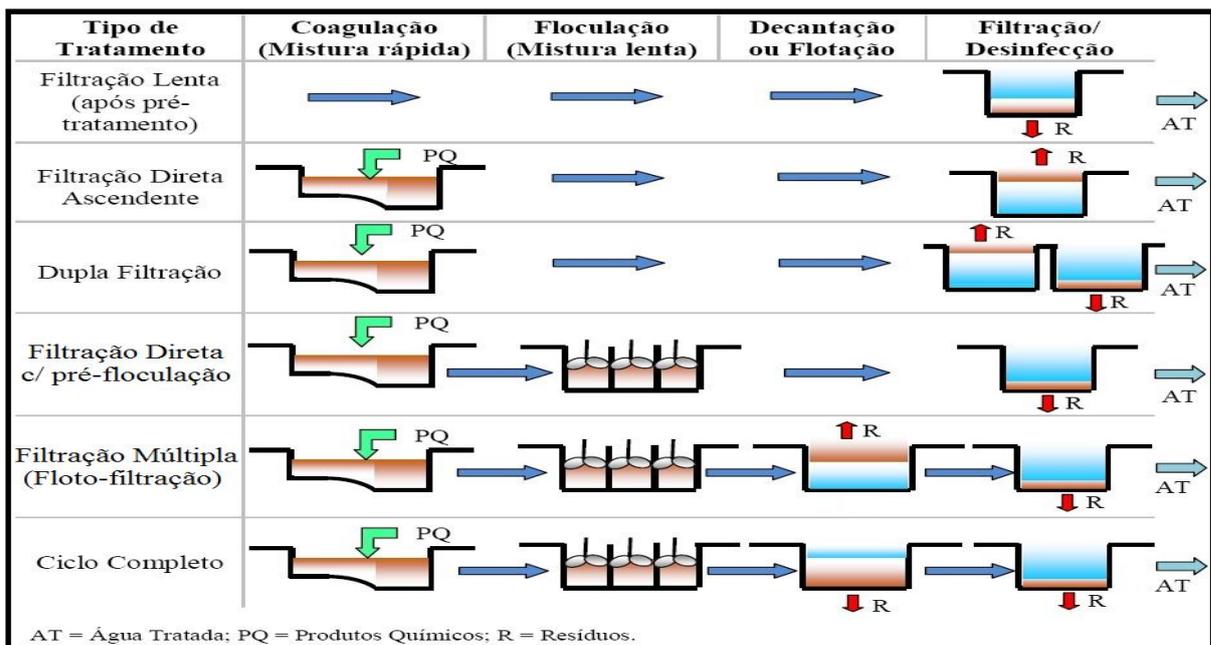
Durante a maior parte do ano alguns mananciais superficiais podem apresentar qualidade que esteja em conformidade com determinada classe da resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005), que o identifica como utilizável para abastecimento público, entretanto, alterações ambientais nas bacias hidrográficas podem promover eventos que, em certos períodos, tornem a água imprópria para abastecimento público, de acordo com essa mesma resolução. A tecnologia de tratamento deve ser primordialmente associada à qualidade da água bruta em qualquer época do ano. A NBR 12.216 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1992) classificou as águas naturais e associou cada uma delas ao tipo de tecnologia

de tratamento recomendado. Entretanto as tecnologias de tratamento recomendadas nas literaturas são simplificações da realidade e visam servir apenas de orientação (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Ressalta-se que, a definição da tecnologia depende da realização de ensaios em bancada ou em unidades piloto.

As Estações de Tratamento de Água (ETAs) desempenham papel primordial para atingir os padrões de potabilidade. A Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, preconiza que toda água destinada ao consumo humano deve obedecer aos parâmetros de potabilidade (parâmetros físicos, químicos e microbiológicos). Para atingir esses parâmetros são utilizadas diferentes tecnologias de tratamento, conforme Figura 1. O tratamento da água bruta tem como objetivos principais a proteção contra microrganismos, remoção de matéria orgânica, substâncias tóxicas, qualidade estética e proteção a rede de distribuição (malha hidráulica) (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

A água bruta pode conter grande variedade de impurezas, com destaque para partículas coloidais, matéria orgânica dissolvida e organismos em geral, impurezas que apresentam carga superficial negativa, impedem que elas se aproximem uma das outras e elas permaneceram em meio líquidos casos suas características não sejam alteradas. Para remoção dessas impurezas é necessário a alteração das características da água e consequente das suas impurezas, através da coagulação, floculação, sedimentação ou flotação e filtração.

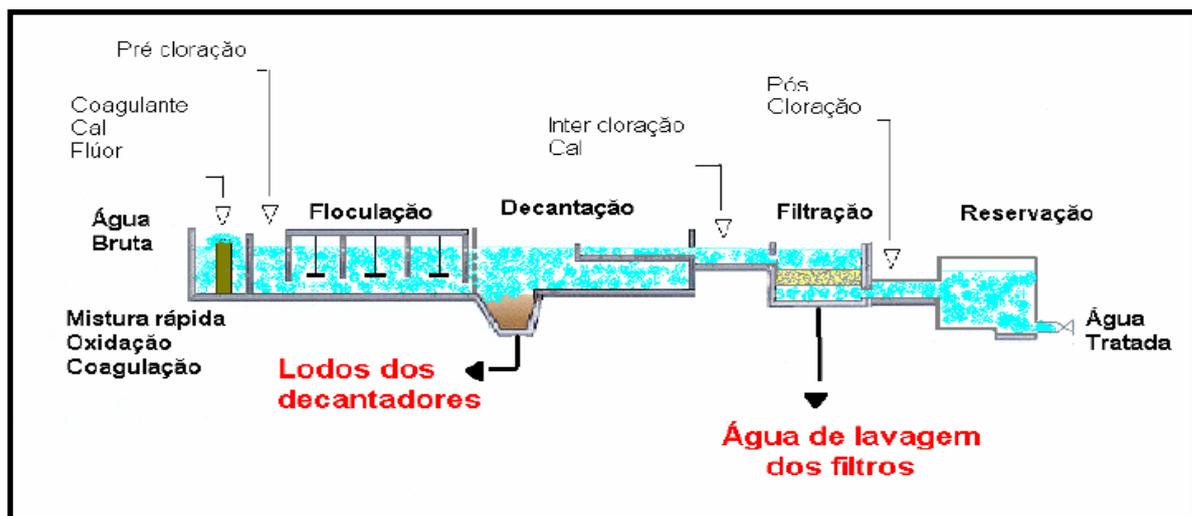
Figura 1 – Tecnologias disponíveis para do tratamento de água



Fonte: Adaptado de RICHTER (2009)

Dentre as tecnologias de tratamento existentes, a que tem uma predominância são as estações de tratamento convencionais (Figura 2), que tem as seguintes etapas: Coagulação, floculação, sedimentação/ flotação e filtração. Essa concepção pode ter algumas variações nas suas etapas, como a troca da etapa de floculação por uma mais eficiente, troca da sedimentação pela flotação, troca da filtração em camada simples pela filtração em dupla camada.

Figura 2 – Concepção ciclo completo para tratamento de água: Etapas do tratamento de água em estações convencionais



Fonte: Adaptado de RICHTER (2009)

3.3 PROCESSOS E OPERAÇÕES NO TRATAMENTO DE ÁGUA

3.3.1 Coagulação

O processo de coagulação tem grande importância na geração de resíduos nas ETAs, com exceção das tecnologias de filtração lenta, filtração em múltiplas etapas e na de separação por membranas sem pré-tratamento. O processo de coagulação é a principal diferença entre as tecnologias de ETA de ciclo completo e as de filtração direta. Enquanto nas etas de ciclo completo a coagulação é predominantemente realizada no mecanismo de varredura (com produção de excesso de precipitados do metal do coagulante), nas de filtração direta a coagulação ocorre no mecanismo de neutralização de cargas das impurezas presentes na água bruta. Por consequência, tanto a massa seca quanto o volume de resíduos gerados nas etas de ciclo completo são maiores que aqueles observados nas etas de filtração direta (FERREIRA FILHO, 2020).

O processo de coagulação é considerado como resultado individual ou combinada da ação de quatro mecanismos distintos:

- Compressão da dupla camada elétrica;
- Adsorção neutralização de cargas;
- Varredura;
- Adsorção e formação de pontes;

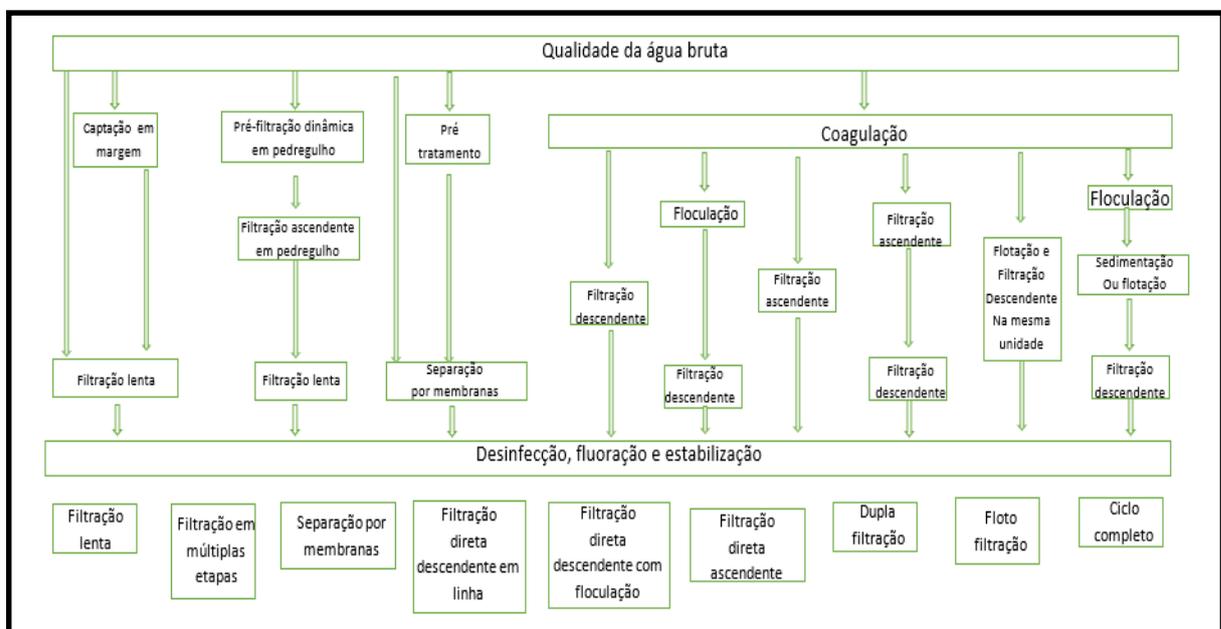
O mecanismo de varredura é intensivamente utilizado nas estações de tratamento de água com concepção de ciclo completo, onde geralmente os flocos obtidos nesses mecanismos são maiores o que facilita o processo de sedimentação, ou leves favorecendo a flotação (mecanismos de varredura com uma quantidade menor de coagulante) (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011).

Em função exclusiva da qualidade da água bruta, as tecnologias podem ser resumidas em dois grupos conforme

Figura 3:

- Sem coagulação;
- Com coagulação.

Figura 3 – Tecnologias de tratamento de água com e sem mecanismo de coagulação



Fonte: Adaptado de Di bernardo, Dantas e Voltan (2017).

3.3.2 Floculação

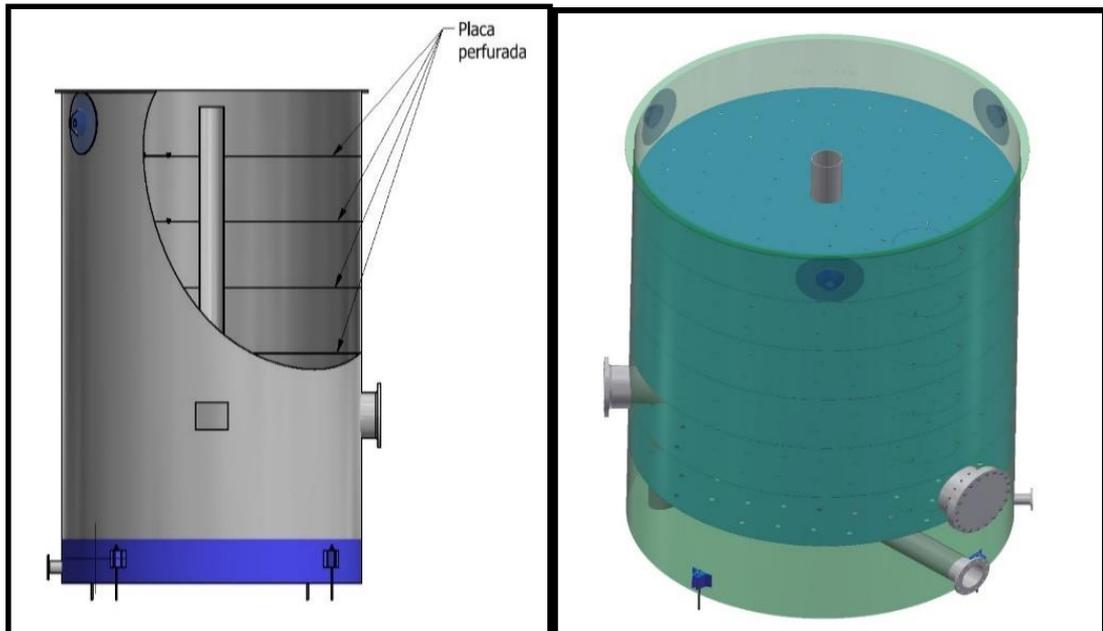
Na cadeia de processos de uma estação de tratamento de água, a coagulação é geralmente

seguida pela floculação (operação denominada de etapa lenta), que pode ser definida como o processo de agregar partículas coaguladas ou desestabilizadas para formação de maioríssima massa ou flocos (RICHTER, 2009), de modo a possibilitar sua separação por sedimentação ou flotação e/ou filtração. Este é o processo mais utilizado para remoção de substâncias que produzem cor e turbidez na água.

Nos tanques de floculação os microflocos aglutinam-se formando flocos, que, ao saírem dos tanques, devem ter tamanho e densidade adequados ao processo de remoção que segue: clarificação por sedimentação ou por flotação e/ou filtração (DI BERNARDO; BOTARI; SABOGAL PAZ, 2005). Ao contrário da sedimentação, nos processos de flotação e filtração direta não é desejável a formação de um floco volumoso. O processo de agregação é dependente da duração e da quantidade de energia aplicada (gradiente de velocidade). Entre as operações de floculação há duas formas: A floculação mecanizada e a floculação hidráulica. Dentre as operações com floculação hidráulica pode-se citar a floculação de bandejas perfuradas (VIANNA, 2019).

O floculador de bandejas perfuradas consiste na disposição de bandejas, igualmente espaçadas entre si, e perpendiculares ao sentido do fluxo vertical da água, conforme Figura 4 (VIANNA, 2019). O gradiente de velocidade de cada bandeja é calculado de forma semelhante ao cálculo de cortinas distribuidoras em decantadores. Adota-se a terminologia floculador em cortinas já que se empregam placas perfuradas, igualmente espaçadas e perpendiculares ao sentido do escoamento horizontal da água, disposição não citada em literatura especializada. Ressalta-se que o gradiente de velocidade de cada cortina também é calculado de forma semelhante ao cálculo de cortinas distribuidoras de decantadores. Os floculadores em bandejas permitem uma melhor agregação do material, além de reduzirem a zona de curto-circuito, variável que deve ser levada em consideração em todos os projetos de floculadores. A operação de floculação sem zona de curto-circuito permite um melhor desempenho da operação (RICHTER, 2001). O gradiente de velocidade é o parâmetro mais importante da cinética da floculação do LETA. O nível de intensidade e o tempo de mistura influenciam na resistência e nas características físicas da formação dos flocos (EDZWALD; HAARHOFF, 2011).

A hidráulica dos floculadores em bandeja é um aspecto importante para garantir o bom desempenho do equipamento no tratamento do LETA.

Figura 4 – Floculadores em bandeja

Fonte: Adaptado de Vianna (2019)

Uma das principais características hidráulicas que devem ser consideradas é a velocidade superficial, que é a relação entre a vazão de água e a área da seção transversal do tanque. Para um bom desempenho dos floculadores em bandeja, é recomendado que a velocidade superficial esteja entre 0,4 e 0,8 m/h (OLIVEIRA et al., 2016).

Além disso, é importante controlar a altura do lodo no tanque, para evitar que ocorra arraste de partículas sedimentadas durante a remoção da água clarificada. Isso pode ser feito ajustando a taxa de alimentação de lodo e a velocidade de agitação das bandejas (ZHAO, *et al.* 2017).

3.3.3 Decantação

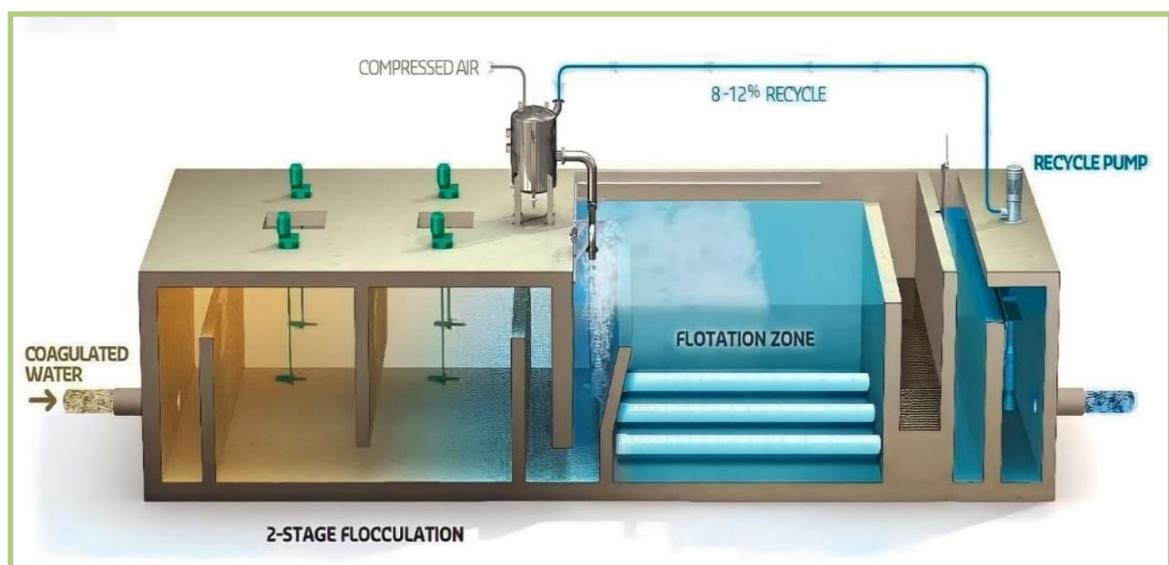
A decantação consiste nas forças gravitacionais para separação das partículas ou flocos pré-formados na floculação, com densidade superior à da água, através da sedimentação em uma superfície ou zona de armazenamento. Esse processo físico propicia a clarificação do meio líquido com a separação das fases sólidas e líquidas. É importante citar a flotação como tecnologia similar, utilizando da ascensão das partículas suspensas aderidas às bolhas de ar para a separação. Nas ETAs a sedimentação é realizada com partículas na forma floculenta, devido a existência de floculadores no processo, e não na forma de partículas discretas, como é o caso de grãos de areia. No movimento descendente os flocos acabam colidindo e gerando alterações do seu tamanho (peso e forma), modificando a velocidade de sedimentação, sendo necessários

ensaios laboratoriais para avaliar esse efeito (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2007). Normalmente não são removidas todas as partículas nesse processo, principalmente em águas eutrofizadas e com cor elevada e turbidez baixa, característica das águas da região nordeste, em particular as do estado de Pernambuco. Assim, é necessário a utilização de filtros para retirar o restante da parte sólida da água, aumentando o número de lavagem dos filtros e a redução da carreira de filtração, além do risco de traspasse durante a operação de filtração, a depender da operação hidráulica da unidade (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

3.3.4 Flotação por ar dissolvido (FAD)

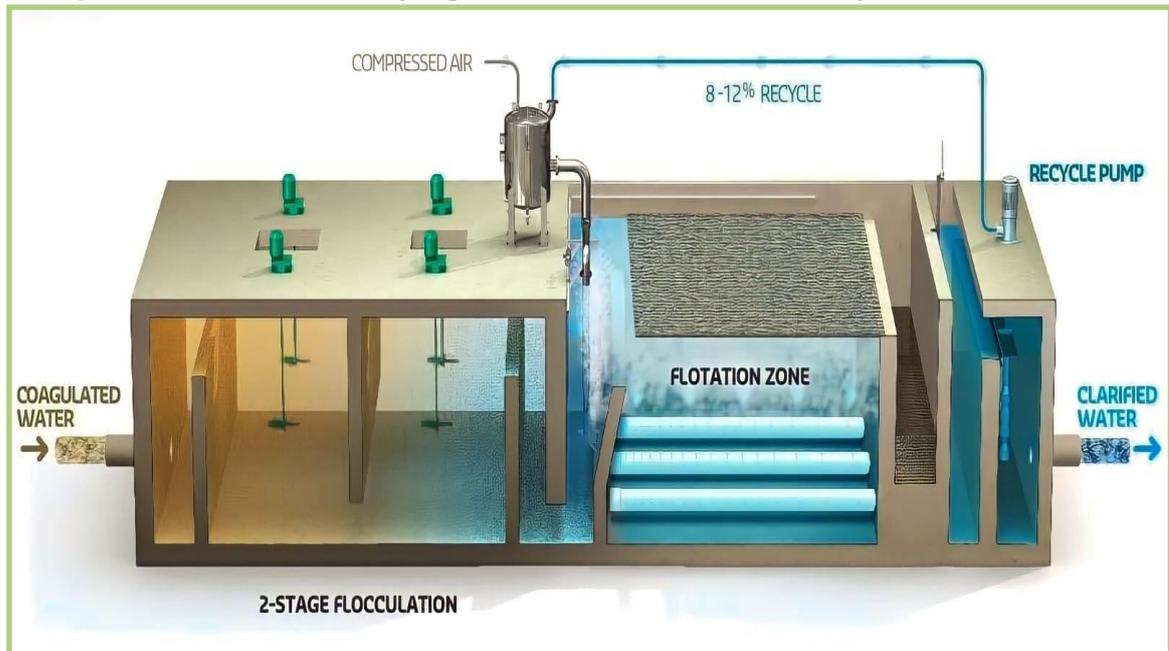
Como em um processo de sedimentação convencional, o tratamento de Flotação por ar dissolvido começa com a aplicação de um coagulante (solução química catiônica, como o sulfato de alumínio, cloreto de polialumínio ou cloreto férrico) para neutralizar partículas aniônicas presentes na água, estimulando seu aglutinamento e, por conseguinte, a formação de flocos. O sistema de flotação por ar dissolvido funciona a partir de um processo onde microbolhas são geradas na câmara de saturação, de forma que essas bolhas se incorporem no interior dos flocos ou por arraste hidráulico. Esses flocos e microbolhas apresentam uma densidade aparente menor que o meio aquoso onde se encontram, o que assegura, por empuxo, sua flotação até a superfície do flotador, onde há formação de um manto de lodo e ocorre a remoção (EDZWALD, 2010), conforme apresentado nas figuras 5 e 6.

Figura 5 – Sistema de flotação por ar dissolvido FAD – Zona de flotação



Fonte: Adaptado de Edzwald (2010)

Figura 6 - Sistema de flotação por ar dissolvido FAD – Formação do manto de lodo

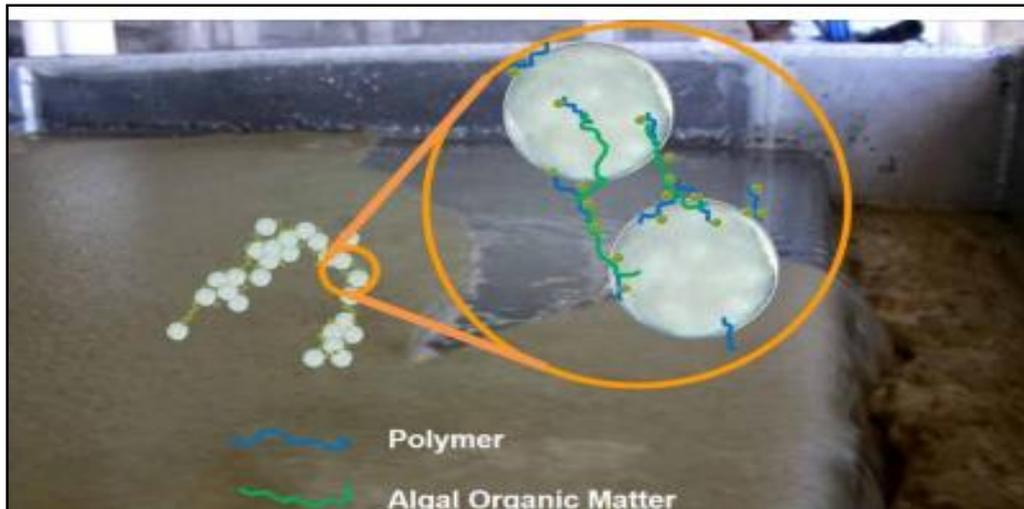


Fonte: Adaptado de Edzwald (2010)

Diferente da sedimentação em que o floco resultante se fixe no fundo do tanque (que de acordo com a Lei de Stokes pode levar de duas a seis horas para partículas mais leves), milhões de microbolhas que variam de 30 a 100 microns de diâmetro carregam o floco para a superfície do tanque (MEGID; AMER; ELSAYED, 2014). Uma vez na superfície, os flocos são removidos por um coletor de espuma. A água limpa é removida por uma tubulação presente no fundo do tanque e é enviada para filtração. No geral, no processo com FAD há redução em 85-90% do tempo, reduzindo o potencial tempo de exposição das algas ao meio, tempo esse em que as algas podem se romper (HAARHOFF; EDZWALD, 2001). A presença de florações de algas e cianobactérias em mananciais que alimentam estações de tratamento de águas é comum e, portanto, há interesse no tratamento adequado desses resíduos para garantir o efluente clarificado de boa qualidade, e usos potenciais dos resíduos, incluindo matéria-prima. Dos métodos explorados, a flotação por ar dissolvido (FAD) é considerado um processo de clarificação mais eficaz do que a sedimentação para águas carregadas de algas, devido à flutuabilidade natural das algas (TEIXEIRA; ROSA, 2006; EDZWALD, 2010). No entanto, o FAD convencional é altamente dependente da coagulação-floculação eficaz, onde as partículas carregadas negativamente precisam ser modificadas pela adição de um coagulante/polímero carregado positivamente (DUAN; GREGORY, 2003). O objetivo de combinar as propriedades do polímero (capacidade de ponte) e tensoativos (hidrofobicidade), com a finalidade de melhorar a aderência da superfície de sólido - bolha com a aplicação do polímero, conforme

exemplificado na Figura 7. Ao aplicar essas microbolhas catiônicas se tem observado a viabilidade do processo (RITA; SIMON; BRUCE, 2010).

Figura 7 – Modificação da superfície da microbolha na etapa de flotação com o uso de polímeros

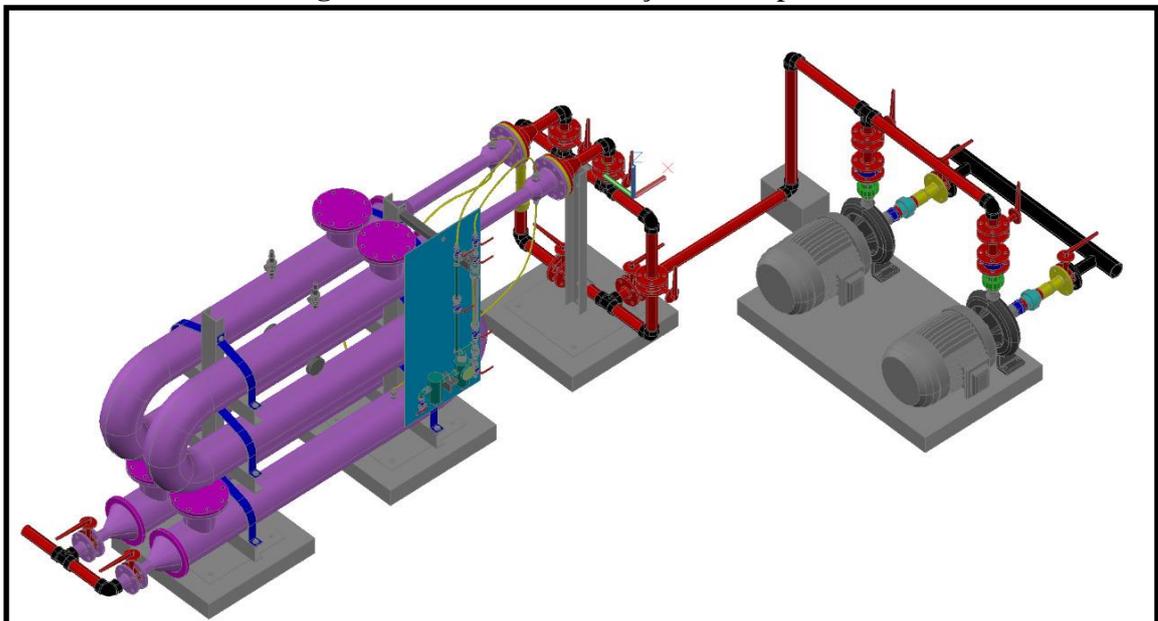


Fonte: Henderson, Simon e Bruce, (2008)

O emprego do sistema de flotação por ar dissolvido vem sendo utilizado em grande escala nos últimos 50 anos. No entanto, ainda há muitas lacunas para serem preenchidas, havendo a necessidade de pesquisas para otimização do processo, bem como o aumento do nível de segurança e qualidade que possa aumentar a eficiência na clarificação, diminuição do tempo de floculação e na questão de custos de investimento e operação. A FAD não deve ser considerada como um processo isolado, mas associada a outras etapas e tecnologias no projeto e operação da estação de tratamento (EDZWALD, 2005). Este conceito demonstra que a floculação em FAD tem exigências diferentes quanto ao tamanho dos flocos quando comparado com a sedimentação, haja vista que os primeiros apresentam flocos para que a densidade do agregado partícula-bolha seja inferior à densidade do meio líquido (LU et al., 2020). A flotação por ar dissolvido (FAD) tem um excelente efeito no tratamento sobre sólidos suspensos que são difíceis de serem naturalmente degradados na água (EDZWALD, 2010). A FAD possui uma grande aplicação no adensamento de minérios e rejeitos de mineração, e com uma série de vantagens, principalmente em relação à cinética, operação e redução de custos, quando comparada com processos convencionais de centrifugação, filtração, oxidação, decantação e fluoretação. Embora o processo esteja consolidado nas áreas de mineração e metalurgia, vem se tornando viável no tratamento de águas residuais e no tratamento do LETA, graças ao desenvolvimento de diversos dispositivos e tecnologias, tais como a torre de saturação em

serpentina (Figura 8), que permite uma melhor homogeneização na câmara de saturação (GHARABAGHI *et al.*, 2017). Nas torres de saturação cilíndricas (mais usuais) há um aumento gradativo na taxa de aglutinação de microbolhas de ar no interior da zona de contato do tanque de flotação (KUMAR *et al.*, 2019). Essa aglutinação é responsável pela diminuição do desempenho da FAD durante o processo de tratamento. No sistema de saturação com vasos cilíndricos, tem mídias (meio suporte recheio) até uma certa altura, já na serpentina o meio suporte (recheio) é ao longo de toda extensão, proporcionando maior agitação, pois, sua seção transversal ao fluxo é menor para uma mesma faixa de vazão (PARK *et al.*, 2012). Quanto maior a agitação menor a possibilidade de aglutinação e formação de bolsão de ar, prejudicial à saturação (HAN; KIM; KIM, 2015).

Figura 8 – Torre de saturação em serpentina



Fonte: Adaptado de Richter (2009)

Quando se introduz o ar e água na torre de saturação a uma pressão absoluta P , o ar se dissolve na água até uma concentração de saturação C_{sat} , de acordo com a lei de Henry (Equação 1: $C_{sat} = nK_H P$), onde n , é a eficiência do tanque de saturação e K_H é a constante da Lei de Henry, dada para o ar em diversas unidades, conforme o tabela 1.

Tabela 1 - Constantes da Lei de Henry para o ar

CONSTANTES DA LEI DE HENRY PARA O AR				
TEMPERATURA °C	(mg/L)/atm	(mg/L)/kPa	(mg/L)/kgf/cm ²	(mg/L)/mca
0	37,3	0,405	36,1	3,61
5	32,7	0,33	31,7	3,17
10	29,3	0,293	28,4	2,84
15	26,9	0,272	26	2,6
20	24,3	0,239	23,5	2,35
25	21,7	0,219	21	2,1
27	21,4	0,211	20,7	2,07
30	20,9	0,202	20,2	2,02

Fonte: Adaptado de Richter (2001)

3.3.4 Sistema de recirculação e relação ar/sólidos (A/S)

Os projetos de unidades de flotação são feitos usualmente com base na experiência de operação de outras unidades, quanto em resultados de ensaios com instalações piloto ou de bancada. A determinação do tamanho dos tanques de FAD para tratamento do LETA baseia-se na taxa de aplicação superficial, sendo usual a adoção de taxas entre 240 e 290 m/d.. Outros autores sugerem faixas mais abrangentes, tais como: 190 a 290 m/d (GREGORY; ZABEL, 1990), 240 a 360 m/d (KAWAMURA, 2000), e 150 a 300 m/d (DI BERNARDO; DANTAS, 2005), o tempo de retenção no flotador usualmente varia de 20 a 30 minutos (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2007).

Em relação às interações ocorridas entre as microbolhas de ar, de acordo com (RAO; GRANVILLE; HENDERSON, 2021), existem quatro forças que afetam o comportamento destas em termos de coalescência: força de *London-van der Waals* (atração), força eletrostática (repulsiva), interação hidrofóbica (atrativa) e repulsão hidrodinâmica (repulsiva). As forças podem ser descritas conceitualmente, porém, sua quantificação é difícil. Pesquisas desenvolvidas têm demonstrado que águas com baixas concentrações de sais favorecem a coalescência entre as bolhas de ar, enquanto em águas com altas concentrações de sais a coalescência praticamente não ocorre (RAO et al., 2018). A baixa estabilidade interfacial bolha/líquido provoca a junção de microbolhas e formação de grandes bolhas de ar, diante da velocidade acelerada de bolhas de maior diâmetro, o tratamento da água ou resíduo/efluente pode ser prejudicado pela ruptura dos flocos, além da impossibilidade de mecanismos de aprisionamento/arraste. A importância do tamanho de bolhas no desempenho da flotação tem

sido investigada e confirmada por diversos autores, além disso, também tem se apresentado como um importante indicador da eficiência da dispersão do gás. Portanto, o tamanho de bolha é uma variável física essencial e determinante na eficiência de flotação (FANAIE; KHIADANI; AYRES, 2019). Quando se fala sobre tamanho de bolha é importante a compreensão de dois fenômenos que influem diretamente no tamanho das bolhas: a coalescência e a quebra de bolhas.

A coalescência é o processo na qual as bolhas se unem para formar uma nova bolha. No processo é identificada três etapas: colisão (controlada pela hidrodinâmica da fase líquida), afinamento e ruptura do filme líquido. Ou seja, para a coalescência acontecer o filme líquido deve afinar até alcançar a ruptura total na qual as bolhas se unem. É importante destacar que, o tempo de adesão das bolhas deve ser maior que o tempo de afinamento do filme, caso contrário, a coalescência não ocorre. Já o último passo de ruptura é bem mais rápido se comparado com as outras etapas (RAO; GRANVILLE; HENDERSON, 2021). A quebra, geralmente, acontece resultante da colisão de bolhas em linhas turbulentas. No fenômeno de quebra das bolhas observa-se, como consequência, a formação de uma distribuição de tamanho de –bolhas filhas, cujo volume é uma fração do volume da –bolha mãe, ou seja, a bolha que sofreu a quebra (KRACHT; FINCH 2009).

Em águas com altos teores de sólidos, como do LETA, a relação entre a quantidade de ar e a quantidade de sólidos afluente ao flotador (relação A/S) pode influir significativamente na eficiência de remoção de sólidos. A relação A/S constitui parâmetro fundamental para o processo de flotação de lodos, pois tem relação direta à quantidade de microbolhas de ar – que são os agentes do processo – disponibilizadas por unidade de massa de SST (REALI *et al.*, 1999). A quantidade de ar aplicada deve ser aquela que faz com que a densidade aparente do aglomerado floco-bolha seja menor do que a densidade do líquido, e a partir daí pode ser determinada a relação A/S necessária (RICHTER, 2001), as relações A/S típicas encontradas no adensamento de lodo em plantas de tratamento de águas residuárias variam entre 0,005 e 0,060 g de ar/ g de SST (METCALF; EDDY, 2017).

3.3.5 Filtração em meio poroso

A Filtração consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais, e de microorganismos presentes na água, que escoam através de um meio poroso. Em geral a filtração é o processo final de remoção de impurezas realizado em uma estação de tratamento de água e, portanto, o principal responsável pela produção de água com qualidade, condizente com o

padrão de potabilidade. A quadro 1 reproduz algumas exigências sobre a remoção de alguns organismos patógenos, assim como a turbidez da água produzida para diferentes tecnologias de tratamento que utilizam filtração (AWWA, 1999).

Filtração direta

Concepção de tratamento onde o mecanismo de coagulação é o adsorção neutralização de cargas, esse mecanismo tem o objetivo da formação de coágulo e no leito de pedregulho se dá a formação do micro floco que por aderência na superfície do pedregulho sequestra os micro flocos que vão se formando para ocorrer o processo de floco-decantação, as concepções dessas unidades são: Dupla filtração = Clarificador ascendente (podendo ser de pedregulho – seixo e areia – manto de lodo) seguido de unidade de filtração rápida descendente; Clarificação ascendente = Requer uma qualidade de água com parâmetros de turbidez e cor muito baixas; Filtração rápida descendente = Requer uma qualidade de água com parâmetros de turbidez e cor muito baixas Floco-filtração = Recomendada para águas eutrofizadas.

Quadro 1 – Remoção de microrganismos e turbidez da água potável

TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO	REMOÇÃO DE MICROORGANISMOS LOG			TURBIDEZ DO EFLUENTE
	<i>Giardia</i>	Vírus	<i>Cryptosporidium</i>	
ciclo completo com flotação ou decantação	2,5	2,0	3,0	≤ 0.3 UT EM 95% das amostras em cada mês – jamais superior a 5 UT
filtração direta (ascendente, descendente ou dupla filtração)	2,0	1,0	2,5	≤ 0.3 UT EM 95% das amostras em cada mês – jamais superior a 5 UT
floto filtração	2,0	1,0	2,5	≤ 0.3 UT em 95% das amostras em cada mês – jamais superior a 5 UT
filtração em múltiplas etapas	2,0	2,0	3,0	≤ 1.0 UT EM 95% das amostras em cada mês – jamais superior a 5 UT

Fonte: Adaptado de Di bernardo, Dantas e Voltan (2017)

Nesse contexto, destaca-se a importância da filtração no tratamento de água como sendo a etapa principal realizada em uma ETA, que constitui uma fundamental barreira sanitária adiante a desinfecção que completa as etapas do tratamento de ciclo completo.

3.4 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA)

O LETA é classificado como resíduo sólido de acordo com a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), que pode estar nos estados sólido e semi sólido resultante de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços de varrição. Para

transformar água bruta em água potável, as ETAs utilizam diversos processos gerando grande quantidade de resíduos, como é representado na Figura 9. Os resíduos sólidos de estações de tratamento de água, concepção de ciclo completo, apresentam características que dependem do tipo de manancial conforme apresentado na quadro 2, os resíduos gerados são oriundos essencialmente na limpeza dos decantadores ou flotadores e nas lavagens dos filtros.

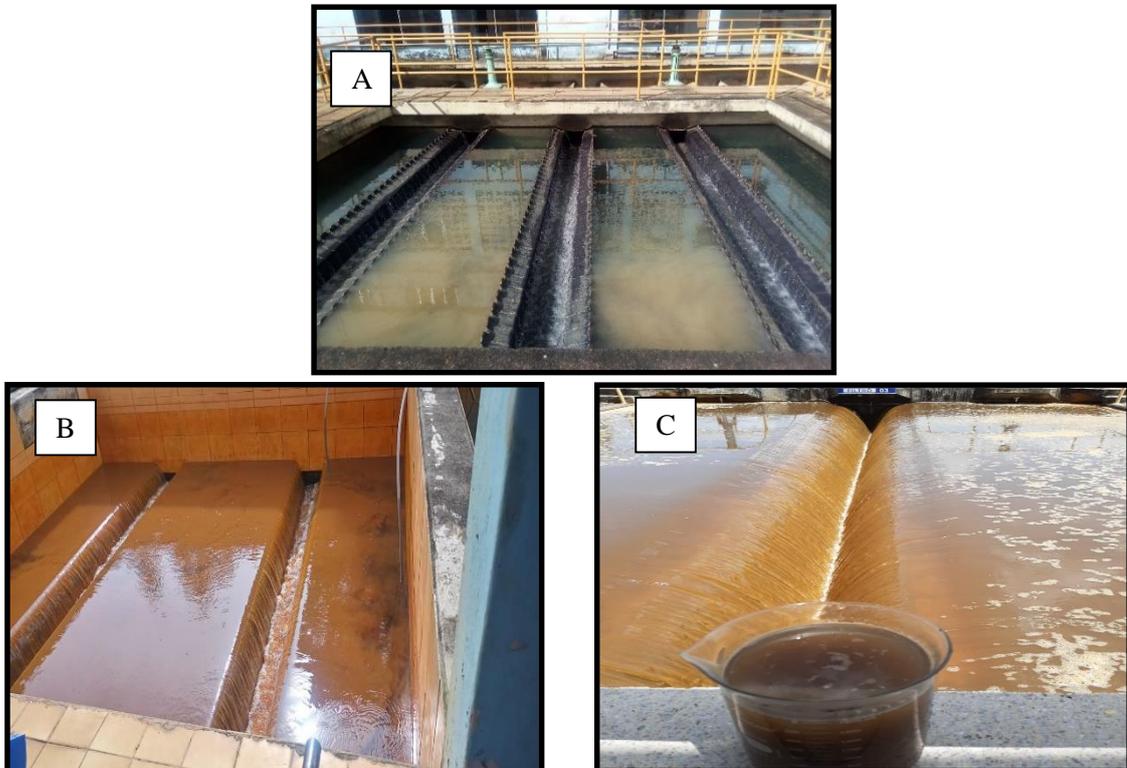
No entanto, existem outras unidades da ETA que também produzem resíduos (câmaras de floculação, câmara de pré-oxidação, de adsorção e pós-desinfecção). É fundamental o conhecimento das variações da qualidade dos resíduos e a realização de ensaios de tratabilidade, antes de empregar qualquer método ou técnica de tratamento no lodo gerado (VIANNA, 2019). A quantificação do lodo gerado na ETA é fundamental para planejar a operação das unidades geradoras, de tratamento e avaliar a sua destinação. Para estações ainda em fase de projeto é desejável a realização de ensaios de bancada ou ensaios em estações piloto por no mínimo um ano para a estimativa mais precisa de como as características da água bruta e sua variabilidade se traduzirão em produção de lodo, dadas as condições de projeto da ETA. Alternativamente, fórmulas empíricas podem ser usadas para obtenção de estimativas menos precisas (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

No que diz respeito a ETAs já existentes, além de fórmulas empíricas, há outros dois métodos de quantificação de lodo possíveis: balanço de massa e determinação direta em campo (YOVANOVIC, 2004). A pertinência de cada um dos três deve ser avaliado caso a caso e, preferencialmente, mais de um deve ser empregado ao mesmo tempo, de modo a permitir verificações cruzadas entre eles (KATAYAMA et al., 2015). As variações entre os resultados mostram que a utilização de equações empíricas traz imprecisão, podendo causar incoerência com a realidade. Ainda assim, essas equações são úteis para estimativa de lodo, devido à maior viabilidade e à facilidade de cálculo, o que justifica a predominância no uso dessas equações (SANTOS; MICHELAN; JESUS, 2021).

Segundo a premissa da Agenda 21 em seu capítulo 21, que trata da gestão de resíduos, a primeira abordagem é a da redução da geração de lodo. Isto é extremamente complexo, visto que, com a crescente degradação da qualidade das águas superficiais tem-se observado um aumento gradativo no consumo de produtos químicos e conseqüentemente na produção de lodo. Assim sendo, as ações de preservação da qualidade ambiental das bacias hidrográficas seriam uma boa opção, não fosse a grande dificuldade de controle da dinâmica urbana. Além dos poluentes tradicionais, os mananciais disponíveis para abastecimento de água contêm poluentes emergentes, tanto químicos como biológicos, entre eles os microplásticos que são pequenos resíduos que vêm dos mais diversos produtos de plástico. Eles podem ser de vários

tamanhos. Às vezes são tão pequenos que podem ser invisíveis a olho nu, mas já se tornaram um dos principais poluentes da água nos rios e oceanos. Sistemas convencionais de tratamento de água e de esgoto utilizados no Brasil não são suficientes para gerar efluentes com qualidade necessária para produzir água de reúso para fins potáveis. Como o reúso potável passará a ser, inexoravelmente, um instrumento fundamental de gestão de recursos hídricos em áreas críticas, tem que ter propostas de sistemas de tratamento avançados para fornecer água segura para o abastecimento público (HESPANHOL, 2016).

Figura 9 – Lodo gerado na Estação de Tratamento de Água (LETA) gerado em e decantadores (A) filtros rápidos descendentes (B) e (C)



Fonte: Autor – Imagens das unidades de tratamento da ETA Tapacurá-PE, 2022.

Quadro 2 - Tipos de mananciais e produção de lodo

Tipo de manancial	Faixa de produção de resíduo (g de sólido seco por m ³ de água tratada)
Água de reservatório com boa qualidade	12 - 18
Água de reservatório com média qualidade	18 - 30
Água de rios com qualidade média	24 - 36
Água de reservatório com qualidade ruim	30 - 42
Água de rios com qualidade ruim	42 - 54

Fonte: Adaptado de Andreoli (2013)

3.4.1 Caracterização e aspectos sanitários do LETA

O LETA caracteriza-se como fluido não-newtoniano, volumoso e tixotrópico, ou seja, o lodo apresenta-se em estado gel quando em repouso e relativamente líquido quando agitado e, é um resíduo composto de água e sólidos suspensos contidos na fonte, acrescidos de produtos aplicados durante o processo de tratamento (RICHTER, 2001). A ETA é uma indústria na qual uma matéria prima, a água bruta, é trabalhada resultando em um produto final, a água potável, gerando durante o processo de transformação a LETA.

O lodo de ETA, “*water treatment plant sludge*”, é assim denominado a nível mundial de acordo com a definição diferenciando do significado de “lama”, que quer dizer resíduo de decantação sem utilização de floculadores (AWWA, 1999). Os lodos de ETA geralmente caracterizam-se pelo baixo conteúdo de compostos orgânicos (entre 5 e 25%) dependendo da concentração desses produtos na água bruta, o LETA tem baixa degradabilidade e matéria orgânica relativamente estável, pois o lodo apresentou uma alta relação de DQO por DBO₅. Também pode se observar o caráter inorgânico nos lodos, evidenciado pela predominância da quantidade de sólidos totais fixos em relação aos voláteis. Geralmente o Fe e Al são utilizados como coagulantes e o lodo produzido tem características químicas conforme apresentado nos quadros 3 e 4. No entanto se apresentam na forma mais comum de sais de Fe⁺³ (ferro) e Al⁺³ (alumínio). O lodo de sulfato de alumino possui baixa biodegradabilidade (RICHTER, 2001). Em geral os primeiros polímeros formados são amorfos ou tem baixa cristalinidade, geralmente recobrando as partículas de argila, também apresenta grande superfície de contato. Os compostos amorfos ou de baixa cristalinidade, em termos químicos, tem como característica principal a elevada capacidade de adsorção de metais (LIBÂNIO,

2010).

Com relação aos aspectos sanitários é importante ressaltar que durante o tratamento de potabilização, as impurezas existentes na água bruta, são concentradas e removidas gerando um resíduo semissólido de qualidade variável em função das características da água bruta. De maneira geral, durante os processos de coagulação e floculação os microrganismos existentes na água aderem-se às partículas sólidas e coloidais, sendo removidas juntamente com o lodo.

Entre os patógenos encontrados em águas superficiais é comum a presença de bactérias do grupo coliforme, microrganismos utilizados como indicadores de contaminação fecal de origem humana, de animais domésticos ou selvagens, como também sistemas sépticos inadequados, ou transbordamento de esgotos; também podem ser encontrados ovos de helmintos e cistos de protozoários (tais como, cistos de *Giardia* e *Cryptosporidium*) patógenos que possuem resistência a oxidantes (CARVALHO, 2018). Lembrando que não é possível encontrar no lodo helmintos ou protozoários propriamente ditos, apenas suas formas de resistência, ou seja, uma única estrutura é suficiente para infectar o indivíduo. Quando presentes na água bruta captada e tratada para distribuição a população, estes microrganismos tendem a concentrar, e serem removidos nas etapas de tratamento (coagulação, floculação, decantação e filtração) juntamente com o lodo, contaminando o resíduo. Desta forma, nos mananciais ocorre lançamento significativo de efluentes sanitários podendo ser observados formas infectantes de microrganismos patogênicos nos lodos removidos do processo de tratamento, e cuidados especiais devem ser tomados na disposição final desses resíduos, para evitar a contaminação da água, do solo e dos alimentos (ANDREOLI, 2013).

Quadro 3 - Características típicas de lodo de sulfato de alumínio

Sólidos totais (%)	$Al_2O_3 \cdot 5H_2O$ (%)	Inorgânicos (%)	Matéria Orgânica (%)	pH	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)
0,1 – 4	15 – 40	35 – 70	15 - 25	6 - 8	30 - 300	30 - 5000

Fonte: Adaptado de Ritche (2001)

Quadro 4 - Características típicas de lodo de sais de ferro

Sólidos totais (%)	Fe (%)	Volatéis (%)	pH
0,25 – 3,5	4,6 – 20,6	5,1 – 14,1	7,4 – 9,5

Fonte: Adaptado de Ritche (2001)

3.4.2 Impacto potencial do LETA nos corpos hídricos

A avaliação do aspecto do impacto do lançamento de LETA em rios é um assunto que ganha bastante relevância considerando um aspecto evidente na literatura. Muitas das restrições ao lançamento de lodo de água nos rios estão associadas à transformação do coagulante utilizado, e com suas reações químicas subsequentes podem influenciar na biota aquática (fauna e flora), quando o alumínio é agregado nos corpos receptores ele mostra-se tóxico, a solubilidade induz mudanças na especificidade do alumínio (Al), podendo alterar-se da forma particulada e orgânica menos tóxica às espécies de monómeros inorgânicos mais tóxicas (WENG; TEMMINGHOFF; VAN RIEMSDIJK, 2002). A química do alumínio no meio aquoso é extremamente complexa; sua toxicidade e bioacumulação nos organismos aquáticos dependem dessa especiação do mesmo no sistema aquático, que é influenciado pelo pH, pela temperatura, pela complexação com ligantes orgânicos e pela duração da exposição (CUNHA *et al.*, 2019).

Além disso, devem também ser avaliadas as alterações na qualidade da água especialmente em relação aos índices de turbidez, DQO, série de sólidos e demais metais. Impactos como a redução de oxigênio dissolvido, decomposição de matéria orgânica em ambientes anaeróbicos, acúmulo de sedimentos no fundo quando o efluente é lançado em baixas velocidades como apresentado na Figura 9, odor, tem sido destacado na literatura como prováveis consequências do lançamento indiscriminado do lodo (DE SOUZA; SCALIZE 2013). Há uma grande interferência nos fenômenos biológicos naturais da macro e microbiota aquática e nos fenômenos de autodepuração do corpo receptor (ANDRADE, 2010).

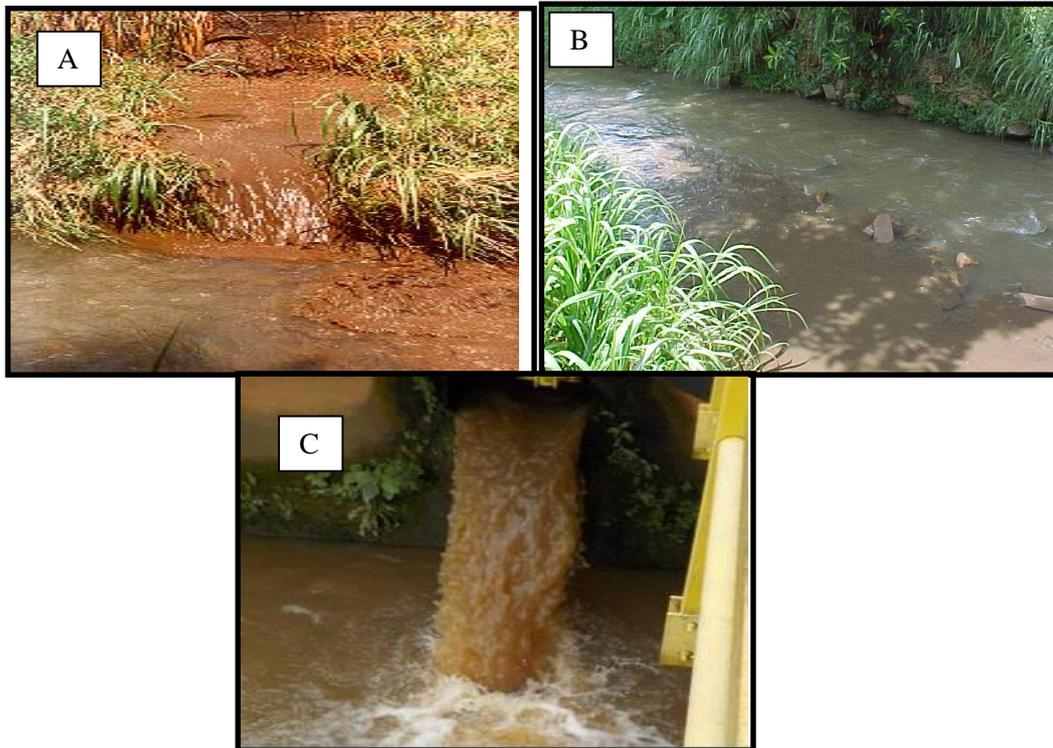
Dentre deste contexto, devem ser analisados dois aspectos relevantes a saber:

- a) Mecanismo de transporte de poluentes em rios;
- b) Alterações químicas, físicas e biológicas que podem ocorrer neste ambiente.

O mecanismo de transporte de poluentes em rios é um assunto que tem merecido a atenção de pesquisadores. O rio é um sistema dinâmico marcado basicamente pela ação da aceleração da gravidade que induz movimento da água em consequências de alterações de inércia para um composto que fisicamente é pesado (alta densidade), conforme figura 10 e 11. Esse movimento, caracterizado pela presença de um campo de velocidade fundamentalmente unidirecional, é um dos principais responsáveis por acentuar o impacto da presença de uma massa extra (contaminante) em sua estrutura. Um rio nada mais é do que uma sequência de infinitos volumes de controle, notadamente variando em uma única direção (unidimensional).

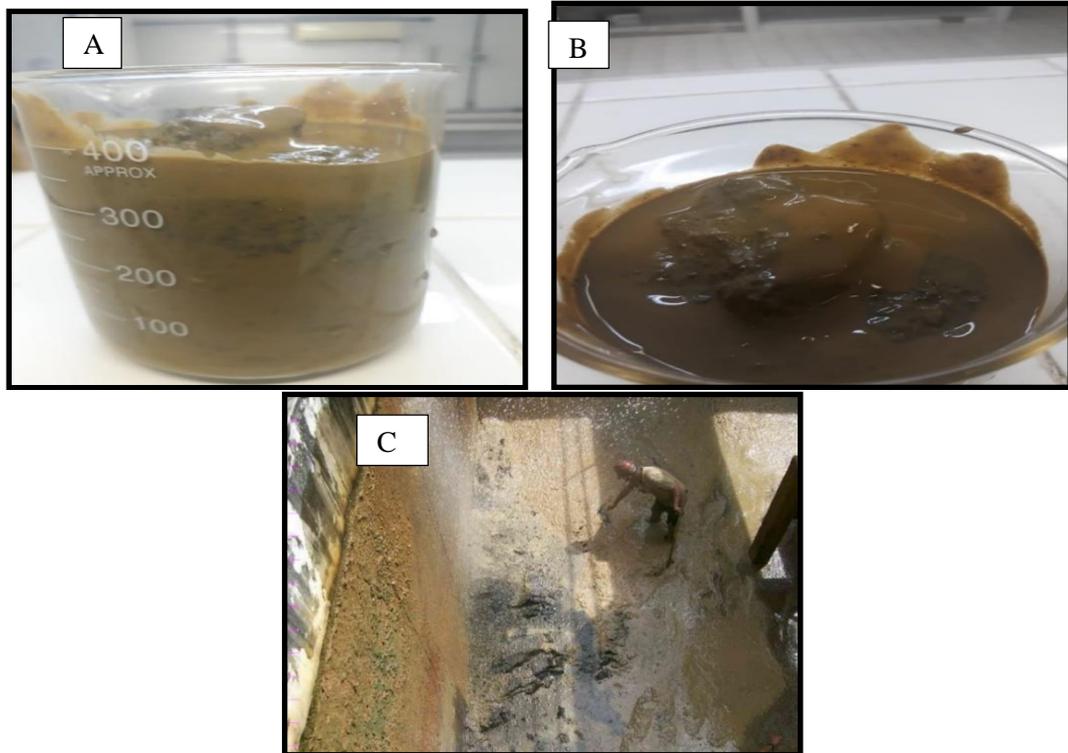
A inserção de elementos de massa, neste caso alterações químicas advindas da estrutura do LETA, faz com que a combinação possa eventualmente ampliar o impacto no ecossistema. Cabe destacar que através da magnitude do campo de velocidades maior será o impacto no processo advectivo de transporte, que dependendo das características do constituinte poderá produzir impactos significativos (BITTENCOURT *et al.*, 2012). Dentro deste contexto, a avaliação dos impactos ambientais está intrinsecamente associada às características do rio no ponto de lançamento e dada a natureza dos elementos metálicos, às características de qualidade da água do corpo receptor, e dos efeitos dinâmicos na bacia e de difícil controle, estes impactos podem ser bem severos.

Figura 10 – Lançamento do Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) em corpos de água, causando alterações nas suas características físico-químicas



Fonte: Andreoli (2013)

Figura 11 – Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) gerado em decantador convencional com remoção hidráulica



Fonte: COMPESA (2021)

3.4.3 Tecnologias de tratamento do LETA

Para a elaboração de um projeto de tratamento do LETA, é imprescindível a realização de estudos sobre a gestão da bacia hidrográfica onde se localiza o manancial de abastecimento, a forma com que a água é captada, a qualidade da água e sua variação durante pelo menos três anos consecutivos, a eficiência das unidades de tratamento, a qualificação e quantificação dos resíduos gerados, a forma de limpeza das unidades que geram resíduos, etc., é preciso fazer um diagnóstico do meio ambiente onde está inserido o sistema de abastecimento, incluindo a ETA (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

A escolha da tecnologia de tratamento para tratar a água de um determinado manancial depende primordialmente da qualidade da água bruta, usualmente é observada, nas últimas décadas, a adoção indiscriminada da tecnologia de ciclo completo com a clarificação realizada principalmente pela decantação, de sorte que os LETA são essencialmente originados nas descargas ou limpezas das unidades de clarificação (decantadores) e nas lavagens dos filtros. Na concepção de projetos deve haver a aplicação do conceito integrado de tratamento onde os aspectos envolvidos são as seleções prévias das tecnologias de tratamento de água e de resíduos

conforme apresentado na figura 12.

Figura 12 – Tratamento integrado de unidades de tratamento de água e de resíduos de ETA



Fonte: Richter (2001)

Devida as diferenças significativas das características quantitativas e qualitativas do LETA gerados por diferentes tecnologias de tratamento de água, a concepção desses sistemas de tratamento pode diferir consideravelmente, conforme Quadro 5. Em relação ao tratamento do LETA é recomendado conhecer as propriedades físico-químicas, microbiológicas e hidrobiológicas, tipo de remoção do LETA em decantadores, se é remoção hidráulica, por removedores mecanizados ou remoção manual, fatores fundamentais para projetar as unidades de condicionamento/equalização, adensamento e desaguamento. Os métodos comumente utilizados para o tratamento dos lodos podem incluir: equalização, regularização da vazão, condicionamento, adensamento, desaguamento e, em algumas situações secagem e incineração.

Quadro 5 – Métodos para tratamento do LETA

TECNOLOGIA	TÉCNICA	CARACTERÍSTICAS
ADENSAMENTO	por gravidade	a separação entre as fases sólida e líquida é baseada na velocidade de sedimentação das partículas sólidas. é aplicado quando a fração sólida é densa.
	por flotação	a fase sólida com densidade inferior ao líquido separa-se através da capacidade de flutuar para a superfície. aplicável para lodos com baixa densidade como aqueles contendo algas e óleos.
DESIDRATAÇÃO MECÂNICA	prensa desaguadora	obtem lodo relativamente seco com 40-50% de sólidos secos. lodo de sulfato com 15 a 20%.
	decantação centrífuga	obtem-se lodo desidratado com 15-25% de sólidos. adequado para áreas com limitação de espaço.
	filtro prensa	aplicável para desidratar sedimentos finos, capaz de obter torta com 40-50% de sólidos.
	filtro à vácuo	indicado para desidratar sedimentos finos granulares, podendo obter torta de até 35-40% de sólidos.
DESIDRATAÇÃO NÃO MECÂNICA	leito de secagem	consiste essencialmente na decantação, percolação e evaporação do lodo. são dimensionados para período de armazenamento de 3 a 4 meses. é dependente das condições climáticas. Suporta carga maior que o leito de secagem requerendo uma profundidade maior, com menor frequência de limpeza. possui alto custo.

Fonte: Adaptado de Richter (2001)

Normalmente, a primeira etapa dos sistemas de tratamento de lodo gerados em ETAs convencionais é o seu espessamento ou adensamento, que é um processo preparatório para o seu posterior e desaguamento final. Essa etapa objetiva a separação de parte da água mais facilmente removível do lodo com vistas à diminuição do volume desse lodo e, conseqüentemente, possibilita a redução no tamanho dos equipamentos utilizados na etapa subsequente de desidratação final do lodo, cujos custos de implantação e de operação (energia, manutenção) dependem do volume e das características do lodo a ser desidratado (ANDREOLI, 2013).

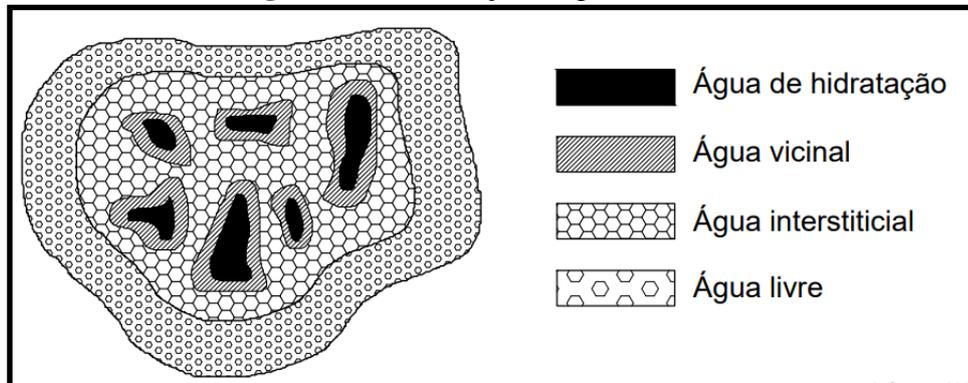
O adensamento é uma das mais importantes operações unitárias do processamento de tratamento da fase sólida, pois, de modo geral, os equipamentos de desidratação mecânica existentes no mercado recomendam uma concentração de ST no lodo de entrada na ordem de 2% para que o seu funcionamento ocorra de forma adequada. Em função da tecnologia de tratamento dos resíduos, o adensamento é o processo subsequente ao tanque de recepção e/ou regularização de vazão de resíduos gerados na ETA. De modo geral é necessário o uso de um polímero para facilitar a saída da água do lodo e, também, que seja atingida a concentração de SST requerida para o processo seguinte, de desaguamento (AYOL; DENTEL; FILIBELI, 2005).

Diversos fatores dificultam a remoção de água do lodo. As partículas de lodo são carregadas eletricamente e tendem a se repelir em vez de formar flocos. Além disso, devido a hidratação, as partículas podem formar uma película líquida carregada negativamente que impede a aproximação das mesmas para que se aglutinem. Por outro lado, o lodo está sujeito a agitação durante seu processamento, o que pode reduzir o tamanho médio dos flocos e, conseqüentemente aumentar a área superficial das partículas, impondo maior resistência à separação das fases sólidas e líquida. De forma geral, o método de tratamento atua sobre as seguintes características principais do LETA: forma, tamanho, carga superficial e grau de hidratação das partículas. Figura 13 mostra um esquema no qual se procura definir as diversas frações de água contida no lodo antes do adensamento e desaguamento. Entre as frações presentes, a de água livre é a mais facilmente retirada do lodo. As demais especialmente a intersticial e a vicinal, são retiradas somente, mediante o uso de polímero e métodos específicos.

observa-se que para a remoção de cada fração de água é necessário uso de uma determinada

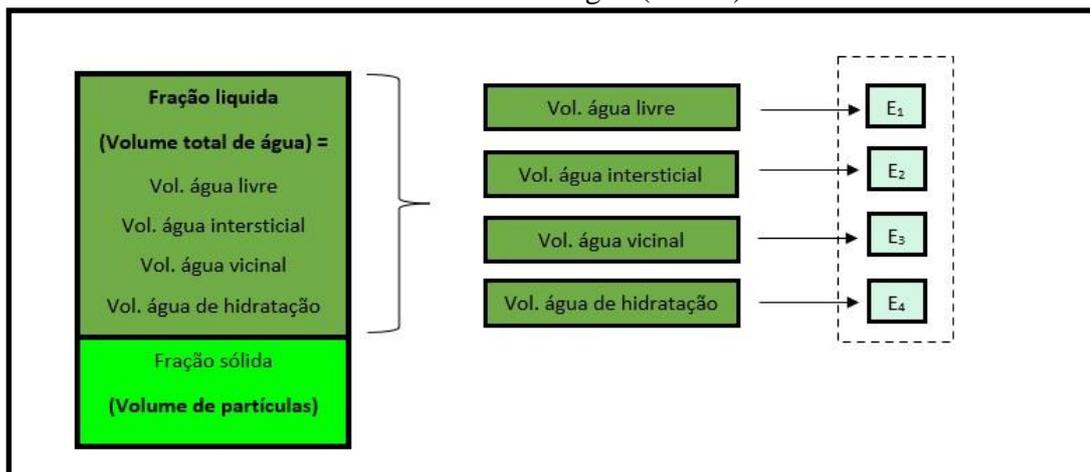
intensidade de energia E_i – Energia Requerida.

Figura 13 – Presença de água no LETA



Fonte: Adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017)

Figura 14 – Níveis de Energia requerida para retirada de água do Lodo de Estação de Tratamento de água (LETA)



Fonte: Adaptado de Barroso *et al.* (2012)

Mesmo com a aplicação de adensadores por gravidade ser mais antigo e difundido em vários países, a alternativa de adensamento por flotação vem conquistando o apreço dos pesquisadores. Através de pesquisas desenvolvidas foi possível identificar as vantagens do adensamento por flotação em relação ao adensamento por sedimentação, principalmente por conta das características dos resíduos gerados (resíduos de tratamento de águas eutrofizadas possuem flocos muito leves o que dificulta a operação por sedimentação), as características dos resíduos de ETAs são afetadas pela incorporação de carbono orgânico via coagulação, há um aumento na concentração de carbono orgânico específico no lodo que prejudica significativamente as características de desaguamento, esse aumento da concentração de matéria orgânica incorporada no floculo (resíduo), torna-o menos denso, diminui a taxa de desaguamento e a concentração final de sólidos (BARROSO *et al.*, 2012).

Entre as vantagens da utilização da flotação estão: taxas de aplicação maiores, unidades mais compactas, cinética das reações, melhor qualidade do lodo adensado e da água clarificada, eficiência na remoção de microrganismos (principalmente cistos e oocistos) e metais (CHAVES; SALES; NETO JOSÉ, 2015). Os cistos e oocistos têm densidade próxima à da água, o que pode dificultar sua remoção por decantação (RAHMAWATI; SUNARSO, 2019). Essas formas de vida podem permanecer suspensas na água por mais tempo devido à sua baixa densidade, resultando em uma menor eficiência de remoção por sedimentação em comparação com partículas mais pesadas, como areia, argila ou sólidos sedimentáveis. A associação de diferentes tecnologias de tratamento do LETA é essencial para garantir a remoção completa e eficaz de cistos e oocistos, especialmente em LETA de águas eutrofizadas ou com alta concentração desses microrganismos patogênicos (LING et al., 2018).

O adensamento do LETA por flotação mostra-se eficaz para o aumento da concentração de sólidos (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Em estudos realizados por concessionárias de saneamento foi comparado os processos de adensamento por sedimentação e por flotação para o tratamento do lodo proveniente de decantadores, os resultados indicam maior eficiência para FAD em termos qualitativos, com uma concentração de sólidos de 36% superior (OYEGBILEA; AY.; NARRAA, 2016; CHAVES; SALES; NETO JOSÉ, 2015). Porém na FAD foram utilizadas altas taxas de reciclo.

É importante frisar que a seleção para o tipo de adensamento do LETA, deve se fundamentar em ensaios de bancada e em unidades piloto de tratamento, a tecnologia a ser aplicada vai depender da qualidade do LETA a ser tratado.

O LETA apresenta característica fluida, as diferentes frações de água presentes nos resíduos são removidas por mecanismos diferentes. O condicionamento do lodo é muito importante para que as etapas de adensamento e/ou desaguamento tenham sucesso. O LETA com algas em sua constituição apresenta baixa desidratabilidade por conta das características orgânicas (HENDERSON; SIMON; BRUCE, 2008). Usualmente o condicionamento do lodo é realizado através da adição de polímeros que podem ser naturais ou sintéticos, e dependendo da carga elétrica que possui em solução aquosa são classificados como: catiônicos, aniônicos e não iônicos, o objetivo é melhorar o processo de adensamento e a qualidade do sobrenadante (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Os polímeros aderem às superfícies das partículas e causam a dessorção de água superficial quimicamente ligada a elas, a neutralização da carga e a aglomeração entre pequenas partículas, como resultado, o lodo produzido é mais facilmente desidratado. É muito importante frisar que o tipo de polímero a ser empregado depende do pH do resíduo, geralmente os catiônicos são mais eficientes em pH abaixo de 7,5 e

os não iônicos e aniônicos funcionam satisfatoriamente em valores de pH entre 7,5 e 8,5, com pH acima de 8,5, o polímero recomendado seria o aniônico (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURION FILHO, 2002).

Pesquisadores vem utilizando no tratamento do LETA com presença de algas, a aplicação de um modificador de superfície de bolhas (RITA; SIMON; BRUCE, 2010), geralmente um polímero catiônico de alta carga e baixo peso molecular, o modificador de bolhas é adicionado ao saturador, o que torna a superfície da MBs (microbolhas) carregada positivamente, essa adição enfraquece a repulsão eletrostática entre MBs e o LETA, promovendo melhor adesão entre os dois e formando flocos que flutuam com mais facilidade (HENDERSON; SIMON; BRUCE, 2009). O Polydadmac, que é um polímero de alta carga e baixo peso molecular, têm bons efeitos na modificação de bolhas e são amplamente utilizados com águas eutrofizadas e resíduos gerados dos tratamentos dessas águas (HENDERSON; SIMON; BRUCE, 2009).

Com a aplicação do modificador de superfície, a atração de cargas tem um papel importante. Quanto mais cargas positivas houver nas superfícies dos MBs, maior é o efeito de adesão, e uma melhor performance na flotação do LETA. O processo de varredura desempenha um papel importante, a longa estrutura de cadeia molecular do polímero aumenta a probabilidade de colisão e adesão de MBs e o LETA, o que é mais benéfico para o adensamento do lodo com essas características.

Nas análises para definição do tratamento do LETA por adensamento e desague final, um dos parâmetros fundamentais utilizado é a Resistência Específica (RE) (MARQUES, 2011). O lodo de ETA convencional, pode ter uma resistência específica relativamente alta, principalmente se a água bruta a ser tratada for de mananciais eutrofizados, o que pode tornar a extração de água mais difícil em comparação com outros tipos de lodo. O LETA é formado durante o processo de tratamento em estações de tratamento de água convencionais, onde microrganismos são utilizados para remover matéria orgânica e outros poluentes da água.

Esse parâmetro é definido como a resistência à passagem de um líquido através de uma massa sólida, e seu método de determinação é baseado no ensaio de tempo de filtração, descrito *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017), podendo também ser realizados cálculos da RE pelo método modificado que adicionalmente leva em consideração a resistência à passagem de água exercida pelo meio filtrante utilizado. A resistência específica do lodo de ETA pode variar dependendo de vários fatores, como a composição do lodo, a concentração de sólidos suspensos, a idade do lodo e as condições de operação da ETA. Valores mais baixos de resistência específica indicam um lodo mais "solto"

e de fácil desidratação, o que é desejável para o processo de tratamento de água.

A RE do lodo de ETA é uma propriedade importante a ser monitorada e controlada em uma ETA, uma vez que afeta a eficiência do processo de tratamento de água, o consumo de energia necessário para a desidratação do lodo e os custos operacionais gerais da ETA. O controle adequado da RE do lodo pode ajudar a otimizar o desempenho da ETA e garantir a qualidade do efluente a ser tratado nas ETEF's.

São diversas as variáveis que interferem na remoção de água dos lodos. O adensamento e desague final do LETA devem ser avaliados de forma abrangente, devido à dificuldade em se correlacionar um determinado parâmetro com a facilidade de remoção de água (CHEN; LEE; LEE, 2005). O LETA que utiliza nas suas operações o coagulante derivado de alumínio, ou de águas eutrofizadas, o adensamento e desague final é muito comprometido comprometida, gerando complicações de questões legais, ambientais e financeiras envolvidas nas etapas de tratamento, transporte e disposição final. Conforme for a tecnologia da ETA, há necessidade de uma tecnologia mais avançada para etapa de adensamento, para elevar o teor de sólidos no líquido. O quadro 6 apresenta alguns valores recomendados pela literatura/fabricantes das tecnologias de desaguamento, para os teores de sólidos mínimo na entrada do sistema, e o teor de sólidos. O teor de sólidos em lodo adensado pode variar de cerca de 2 a 8% em PESO (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012). No entanto, o teor de sólidos ideal para o lodo adensado depende do processo subsequente de tratamento de lodo e do equipamento utilizado, como centrifugas ou outros sistemas de desague (CAMPOS *et al.*, 2019).

Quadro 6 - Valores de teor de sólidos para diferentes tecnologias de desaguamento

Tecnologia de desaguamento	Teor de sólidos mínimo antes do tratamento (%)	Teor de sólidos após o tratamento (%)
Centrífuga	2 % (Di Bernado <i>et al.</i> , 2012)	20 - 30% (Cornwell, 1987)
Filtro prensa de esteiras	1 - 2 % (Di Bernado <i>et al.</i> , 2012)	20 - 25% (Cornwell, 1987)
Leitos de secagem	-	30 - 40% (Silveira, 2012)
Lagoa	-	7 - 15% (Cornwell, 1987)
Tubo Geotêxtil	1 % (Di Bernado <i>et al.</i> , 2017)	20 - 30% (Guimaraes <i>et al.</i> , 2014)

Fonte: Adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012)

Os quadros 7 e 8 apresentam os parâmetros gerais de projeto de adensamento por flotação segundo a AWWA (1999) e a AWWA e ASCE (1998). Os valores mostrados nessa tabela são apenas indicativos, uma vez que eles podem ser obtidos pela realização de ensaios em laboratório ou instalações piloto.

Quadro 7 - Parâmetros de projeto de adensadores por flotação (AWWA,1999; AWWA, ASCE 1998)

RESÍDUO/COAGULANTE	TAXA DE APLICAÇÃO DE SÓLIDOS OU FLUXO DE SÓLIDOS – TFS (KGSST/M ² .DIA)	TEOR DE SST (%)
Gerado em ETAS que usam sal de alumínio (sulfato de alumínio ou PAC)	30 A 180	3 A 6
gerado em ETAS que usam sal de ferro (sulfato férrico, cloreto férrico, sulfato ferroso)	80 A 150	2 A 4

Fonte: Adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012)

Quadro 8 - Parâmetros de projeto de adensadores por gravidade (AWWA,1999; AWWA, ASCE 1998)

RESÍDUO/COAGULANTE	taxa de aplicação de sólidos ou fluxo de sólidos – TFS (KGSST/M ² .DIA)	teor de SST (%)
Gerado em ETAS que usam sal de alumínio (sulfato de alumínio ou PAC)	3 a 8	4 a 8
Gerado em ETAS que usam sal de ferro (sulfato férrico, cloreto férrico, sulfato ferroso)	4 a 9	3 a 6

Fonte: Adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012)

3.4.4 Panorama da gestão ambiental e destinação final do LETA no Brasil e em Pernambuco

A proteção jurídica do meio ambiente teve seu início a partir da segunda metade do século XX, quando o ser humano começou a se preocupar com a escassez de recursos naturais tão fundamentais para vida na Terra. Seguindo uma tendência internacional, a Constituição Federal de 1988 dedicou um capítulo próprio ao meio ambiente. Tratando da matéria ambiental de maneira singular, é chamada por alguns de “Constituição Verde” (BENJAMIN, 2005).

O art. 225 da Constituição Federal de 1988 (BRASIL, [2016]) diz que: “Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”. Fica claro que é papel da sociedade e dos órgãos ambientais a utilização sustentável do meio ambiente.

Nos EUA o lodo de ETA é considerado resíduo industrial de acordo com a emenda da “National Pollutant Discharge Act” de 1972, sofrendo assim, restrições legais (RICHTER, 2001). Hoje a legislação vigente para a classificação das água e padrões de qualidade no EUA é regido pela “Section 303 CWA, FWPCA” e os padrões de lançamentos seguem a “Section 301, Section 304 CWA, Discharge Guidance Documents EPA”.

Alguns estados da união e o próprio governo federal criaram leis e normas que visam a

preservação da qualidade dos corpos de água, e também, sua classificação em função do uso da qual se destina, de acordo com as leis brasileiras antes da instalação de uma ETA ou ETEF, é preciso proceder ao licenciamento ambiental.

Os órgãos responsáveis pelo licenciamento no âmbito dos estados são os órgãos estaduais do meio ambiente (CPRH no estado de Pernambuco), e no âmbito federal o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), órgão federal criado pela Lei nº 7.735 de 22 de fevereiro de 1989. No caso federal o licenciamento é regido pela Lei 6938 de 1981, as resoluções CONAMA nº 001/1986 (BRASIL, 1986) e nº 237/1997 (BRASIL, 1997).

No Paraná, a Resolução SEMA N.º 021/2009 estabelecida pela Secretaria de Meio Ambiente, dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento (PARANÁ, 2009).

No Ceará, a SEMACE possui diretrizes e exigências específicas em relação ao tratamento de lodo de ETA. Essas diretrizes incluem aspectos relacionados ao licenciamento ambiental, ao monitoramento da qualidade da água, à destinação final do lodo, à proteção do meio ambiente e à saúde pública.

Em seu artigo 13º fica determinado que as estações de tratamento de água ficam obrigadas a apresentar, ao Instituto Ambiental do Paraná (IAP), para sua aprovação e acompanhamento, o relatório de monitoramento dos resíduos gerados no processo de tratamento. A frequência varia de acordo com a vazão da ETA, sendo que para ETA's com vazão até 30 L/s, deve-se apresentar o relatório a cada dois anos e para ETA's com vazão superior a 30 L/s, deve-se apresentar anualmente.

Recentemente o Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) de Minas Gerais, publicou, em abril/2022, a Deliberação Normativa 245/2022. A medida estabelece novos prazos para a regularização ambiental de sistemas de tratamento de água no Estado para municípios que possuem Estações de Tratamento de Água (ETA's) com vazão atual superior a 20 l/s (vinte litros por segundo).

A Lei 12.305/2010 define resíduos e rejeitos, sendo o primeiro passível de ser reutilizado e reciclado. O lodo de ETA se enquadra como resíduos sólidos e, portanto, precisa ser gerenciado de tal forma a garantir as premissas da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei 12.305/2010): “Art. 13. Para os efeitos desta Lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação: “I - Quanto à origem: [...] e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”.

A legislação brasileira tem instrumentos legais que exigem que os resíduos de Estações de tratamento sejam tratados antes de ser lançado nos cursos de água ou no solo. A resolução

CONAMA n° 430 de 13 de maio de 2011 complementarmente e ajustada a resolução CONAMA n° 357 de 17 de março de 2005, dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos receptores. No entanto, não há Resolução do CONAMA que disponha sobre o tratamento e disposição do lodo de ETA. Existe somente a Resolução CONAMA n.º 375, de 29 de agosto de 2006, que define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em ETEs e seus produtos derivados (BRASIL, 2005). Portanto, utiliza-se a Resolução CONAMA n.º 375 de 2006 como base para se comparar os parâmetros quando se destina o lodo de ETA em corpos receptores, áreas degradadas e/ou disposição controlada em solo (PAIVA; PARREIRA, 2012).

Esta normatização apresenta também a classificação dos resíduos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública em ordem decrescente de periculosidade:

- a) Classe I (Resíduos perigosos)
- b) Classe II (Não perigosos)
- c) Classe IIA (Não inertes)
- d) Classe IIB (Inertes)

A Lei n° 9.605/1998, conhecida como Lei de Crimes Ambientais, é a principal legislação brasileira que dispõe sobre os crimes e infrações contra o meio ambiente. Em relação ao lodo de ETA, a lei estabelece que é proibido o lançamento de resíduos sólidos ou líquidos em corpos d'água, solo ou atmosfera, sem o devido tratamento e autorização dos órgãos competentes.

Além disso, a lei prevê sanções para as empresas ou indivíduos que não cumprem as normas ambientais, incluindo multas, interdição de atividades, suspensão de licenças e até mesmo a responsabilização penal em casos de crimes ambientais. Assim, é importante que as empresas responsáveis pela geração e tratamento do lodo de ETA sigam as normas e legislações ambientais vigentes, buscando sempre as melhores práticas para a destinação final desse resíduo, visando minimizar os impactos ambientais e evitar possíveis sanções legais.

A normatização relaciona o grau de periculosidade com as exigências requeridas para sua disposição final para resíduos contaminados. De forma geral o LETA são enquadrados na classe II A. A melhoria da especificação do coagulante utilizado e conseqüente melhoria da qualidade do coagulante poderia mudar o enquadramento do lodo. As leis de crimes ambientais n° 9.605 de 12 de fevereiro de 1998 no capítulo V, Seção III, artigo 54 inclui como crime ambiental, com pena de reclusão de 1 a 4 anos e multa: “Causar poluição de qualquer natureza que resultem ou possam resultar danos á saúde humana, ou que provoque a morte de animais ou destruição significativa da flora (BRASIL,1998)”. No seu parágrafo 2º, inciso V, aponta que

se o crime ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos, a pena prevista é de reclusão de um a cinco anos.

No Brasil a coibição da prática de lançamento de resíduos do LETA está evidenciada através de políticas públicas (Política Nacional do Meio Ambiente e de Recursos Hídricos, Política Nacional de Saneamento Básico e Política Nacional De Resíduos Sólidos). O desenvolvimento de pesquisas para tratamento e reaproveitamento do lodo é fundamental para evitar a prática errada de disposição, garantindo o gerenciamento do LETA de forma correta e evitando impactos ambientais (CARNEIRO *et al.*, 2018). Outro ponto muito importante é a outorga de recursos hídricos para o lançamento de efluentes, no estado de São Paulo, os efluentes nos corpos d'água, são obedecidas à legislação federal e estadual pertinentes à espécie dependerão de Outorga de Direito de Uso, passada pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) através da Portaria DAEE 717/1996, além da outorga outra exigência é o estudo de autodepuração do corpo receptor.

O estudo de Autodepuração de Corpo Receptor define a capacidade que determinado corpo d'água, seja ele córrego, ribeirão, rio, lago, represa, possui de depurar o residual de matéria orgânica e outros compostos presentes no esgoto e/ou outros líquidos tratados. O Estudo de Autodepuração de Corpo Receptor é necessário e obrigatório sempre que houver o interesse ou necessidade de descartar qualquer líquido tratado em águas superficiais, independente da forma ou característica do corpo receptor, entregando, como resultado final, quais serão as características da água após receber e diluir os líquidos tratados.

O Estudo de Autodepuração de Corpo Receptor deve ser criteriosamente estudado e elaborado, pois envolve diversas etapas, como:

- a) Identificação do ponto exato de lançamento;
- b) Delimitação da bacia de contribuição para o ponto de interesse;
- c) Determinação da qualidade da água a montante do lançamento;
- d) Identificação da classificação do corpo d'água;
- e) Determinação da vazão $Q_{7,10}$ do corpo receptor (estudo de autodepuração, para o curso d'água é considerado a vazão $Q_{7,10}$, a vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de recorrência obtida através de estudos hidrológicos (VON SPERLING, 2014);
- f) Cálculo da diluição dos compostos presentes nos líquidos tratados e lançados;
- g) Avaliação dos efeitos da diluição.

Com o resultado do Estudo de Autodepuração de Corpo Receptor em mãos, deve-se avaliar e analisar quais serão os impactos para aquele corpo d'água, se será desenhado da sua classificação, se as concentrações dos compostos ficarão acima ou abaixo das permitidas e se não causará impactos para possíveis usuários localizados a jusante do lançamento.

O gerenciamento ambiental de uma ETA é importante para garantir a qualidade do produto final e diminuir a geração de resíduos. O conceito de resíduo vem se reinterpretando como uma matéria-prima de um novo processo, ou seja, um produto é considerado resíduo quando não tenha sido usado em todo seu potencial (PORRAS, 2007).

Em Pernambuco avaliando a produção do LETA nas bacias hidrográficas, podemos considerar que as maiores geração de lodo estão na Região Metropolitana de Recife, onde há elevada densidade populacional, onde estão os municípios com maior produto interno bruto (PIB), onde estão localizadas as ETAs com as maiores vazões, entre elas, a ETA Presidente Castelo Branco, conhecida como ETA Tapacurá que tem uma vazão nominal de 4,0 m³/s, mas operando atualmente com vazão de 3,2 m³/s, necessitando assim de uma boa gestão desses resíduos (COMPESA, 2021).

A empresa responsável pelo saneamento básico no estado de Pernambuco é a COMPESA, que vem desenvolvendo o seu Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), esse plano tem o objetivo de identificar o tipo e a quantidade de resíduos sólidos gerados e as práticas adotadas pelas empresas para a segregação, coleta, armazenamento, transporte, reciclagem, destinação e disposição final.

Em 2020, através da contratação do Consórcio NipponKoeiLac/Incibra/Engebio, deu-se início à elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) das unidades localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca, Região Metropolitana e Fernando de Noronha, cujo objetivo é mapear os resíduos existentes nas ETAs, ETEs e Gerências Regionais, identificando onde são gerados, armazenados e destinados tais resíduos, além de propor um Plano de Ação para mitigar as não conformidades detectadas. O trabalho também identificou os possíveis receptores dos resíduos gerados pela Compesa, por meio da realização do Diagnóstico Ambiental nas áreas em epígrafe, com o mapeamento das cooperativas de reciclagem, indústrias de cerâmica, concreto e asfalto (para destinação do lodo gerado nas unidades) (COMPESA, 2021).

O Estudo de Viabilidade Econômica (EVE) contemplou 12 ETEs e 24 ETAs em 2020, e em janeiro e fevereiro de 2021 o PGRS foi elaborado para 23 ETAs da Região Metropolitana de Recife, além da Sede Administrativa, Laboratório de Análises, Centro de Distribuição e o arquipélago de Fernando de Noronha (COMPESA, 2021).

É importante salientar que a agenda 2030 da ONU para o desenvolvimento sustentável aponta, nos seus itens 6 e 12 respectivamente, assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e saneamento e a necessidade do consumo e produção responsáveis. Além disso, a utilização do lodo como adubo agrícola ou combustível pode contribuir para a realização de outras ODS, como a ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável) e a ODS 7 (Energia Limpa e Acessível).

Vale ressaltar também que a economia circular, e nela incluído o reuso, é fundamental para o desenvolvimento sustentável e para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Configura-se importante a geração de receitas por meio da expansão do campo de atuação através do aproveitamento dos efluentes e resíduos que hoje representam apenas custos operacionais, além de causarem impacto ambiental, fazendo-se necessário o aprofundamento das possibilidades de reuso e difusão desse conceito na Companhia. Nesse contexto, pensando em incremento de receita, redução de custos e mitigação de impactos ambientais, a Compesa busca parceiros que queiram explorar o potencial de reuso de subprodutos de ETA's E ETE's, nos moldes de Manifestação de Interesse Privado (PMI), previstos no regulamento de licitações, contratos e convênios da Compesa e dentro das legislações vigentes (COMPESA, 2021).

Os impactos ambientais causados pelas estações de tratamento de água (ETA) não se limitam somente aos resíduos gerados durante a operação, mas sim, desde a sua etapa de projeto e implantação (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURION FILHO, 2002). Diante disso, foi proposto como medidas mitigadoras: a proteção do manancial de abastecimento, minimização do volume de lodo produzido, minimização de água utilizada para a limpeza das unidades de tratamento, recuperação da água de lavagem de filtros (LUSTOSA *et al.*, 2017), recuperação de coagulantes, tratamento e disposição final de resíduos gerados em ETAs através da utilização do lodo na construção civil, agricultura, indústrias cerâmicas, recuperação de áreas degradadas, produção de tapetes de grama, substrato vegetal, produção de solo comercial para selamento de células de aterro, disposição controlada no solo, codisposição com lodo de ETE.

3.5 ETA TAPACURÁ, OPERADA PELA COMPESA

Existem várias barragens que foram construídas com a finalidade de acumulação de água para o abastecimento da população residente na Região Metropolitana do Recife (RMR). dentre elas a barragem de Tapacurá, que contribui com o percentual de aproximadamente 75%, em conjunto com a Barragem Duas Unas, que contribui com um percentual de 25%, sendo a água bruta transportada para a ETA Presidente Castello Branco, também conhecida como ETA

Tapacurá, representada nas figuras 15 e 16, que está localizada no bairro do Curado, no Município de Jaboatão dos Guararapes, e tem capacidade nominal para tratamento de 4m³/s (COMPESA, 2021).

O maior problema relativo ao aporte hídrico na RMR é a sua insuficiência em quantidade, para o consumo humano, que ocorre ciclicamente com as secas. Além do aspecto quantitativo, há também uma forte preocupação com o aspecto qualitativo. O nível de eutrofização está comumente associado ao uso e ocupação do solo predominante na bacia hidrográfica. Com base nessa afirmativa, elencam-se que as principais atividades impactantes negativas que elevam a concentração de P e N nos recursos hídricos superficiais da Região Metropolitana do Recife são:

- a) Lançamento de Efluentes Domésticos na Drenagem;
- b) Barramentos de Rios;
- c) Desmatamento;
- d) Uso de Agrotóxicos Próximo a Rede de Drenagem;
- e) Ferti-Irrigação Próxima às Drenagens;
- f) Ocupação Inadequada das Áreas Baixas das Margens;
- g) Alteração Antrópica da Foz;

A Eta Tapacurá que compõe o sistema de abastecimento da Região Metropolitana de Recife, é responsável pela produção de água tratada para atender cerca de 25% da população da RMR, abrangendo os municípios de São Lourenço da Mata, Camaragibe e Zona Sul do Recife.

Figura 14 – ETA Tapacurá – Recife/PE



Fonte: Autor (2023)

Figura 15 – Decantadores da ETA Tapacurá – Recife/PE



Fonte: Autor (2023)

Tapacurá vem sofrendo processo contínuo de degradação ambiental, afetando inclusive a qualidade de suas águas. Esse reservatório vem apresentando sucessivas e massivas florações das microalgas cianobactérias *Planktothrix*, *Geitlerinema*, *Merismopedia*, *Aphanizomenon*, *Cylindropermopsis*, *Pseudoanabaema*, *Raphidiopsis*, *Lyngbya*, *Coelomoron.*, as quais têm comprometido seriamente a qualidade de água e tem despertado a atenção da COMPESA, que acompanha, monitora e realiza as análises hidrobiológicas da água desse reservatório.

A bacia hidrográfica do rio Tapacurá conta com doze sub-bacias sendo as principais formadas pelos riachos Itapessirica, Natuba, Gameleira e Várzea do Una e abrange seis municípios, sendo que 38,6% localizam-se em Vitória de Santo Antão, 31,2% em Pombos, 19,8% em São Lourenço da Mata, 4,3% em Gravatá, 3,3% em Moreno e 2,8% em Chã Grande.

4 METODOLOGIA

4.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE PILOTO

A implantação da unidade Piloto Floco Flotador Por Ar Dissolvido (FFAD) na ETA de ciclo completo Presidente Castelo Branco (ETA Tapacurá), localizada na Região Metropolitana

do Recife (Pernambuco, Brasil), foi na área externa do hall de entrada para visitantes, ficando próxima do tanque de equalização da água da descarga e lavagem dos filtros. Atualmente, esta estação não possui o tratamento de resíduos gerados na unidade.

O sistema piloto (Figura 16) instalado na ETA Tapacurá, contou com um tanque para equalização da água da lavagem dos filtros e um para resíduos de descarga dos decantadores (tanque de recepção na unidade) e um tanque pulmão para recepção do sobrenadante dos dois tanques e posterior transporte para unidade de floco-flotação. Uma unidade piloto de floco-flotação por ar dissolvido (FFAD) foi projetada e desenvolvida para tratar água de lavagem dos filtros (ALAF) e a água com resíduos das descargas dos Decantadores (DD) oriunda de ETA.

A estação de tratamento de resíduos piloto possui 3 unidades de floculação hidráulica em bandejas, correspondendo à etapa de mistura lenta com três bandejas perfuradas por floculador. Os orifícios das bandejas possuem diâmetros previstos em projeto e garantem gradientes variando entre (30 s^{-1} a 100 s^{-1}), seguido da FAD.

Essa concepção, na etapa de adensamento, surgiu na observação da ineficiência dos processos de adensamentos usuais para tratar o lodo oriundo de águas eutrofizadas e com cor alta e turbidez baixa, como é o caso da água bruta aduzida para ETA Tapacurá. O tratamento visou à redução dos volumes de lodo, e principalmente, melhorar qualitativa e quantitativamente o lodo que será enviado à etapa de desague e da água clarificada (sobrenadante) que será enviada ao início do tratamento (calha Parshall) e/ou devolvida ao corpo receptor.

Figura 16 – Local da implantação da unidade de Floco-flotação por ar dissolvido na Estação de Tratamento de Água (ETA) Tapacurá (Pernambuco, Brasil)



Fonte: Autor (2023)

4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho foi realizado no período de 10 de abril 2021 a 20 junho de 2022 e ocorreu em seis etapas conforme apresentado na figura, que consistiram em estudar o tratamento do efluente proveniente da lavagem apenas dos filtros e da água da descarga dos decantadores da ETA Tapacurá. Os ensaios foram realizados no Laboratório Central da Gerência de Controle de Qualidade (GQL), e os ensaios na unidade piloto na ETA Tapacurá, em acordo de cooperação técnica firmado entre a COMPESA e o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE). Ao longo do desenvolvimento do projeto foram realizadas as etapas apresentadas na figura 17:

Figura 17 - Etapas da pesquisa

Fonte: Autor (2023)

Etapa 1 - Levantamento bibliográfico e documental, e localização da bacia hidrográfica

- Etapa 1a - Para subsidiar as informações necessárias para este trabalho, o levantamento bibliográfico e documental, foi realizado nas fontes documentais da GQL e Gerência de Segurança de Barragens, ambas da COMPESA.
- Etapa 1b – Para as informações referentes à localização (Figuras 24 e 25), tipo de solos, delimitação, uso e ocupação da bacia Hidrográfica da Barragem Tapacurá (Figuras 26 e 27), utilizou-se uma versão livre do software Quantum GIS, popularmente conhecido como QGIS, conhecida como GRASS, que é um sig orientado a dados raster e vetoriais conduzidos através de um módulo próprio dentro do QGIS.

a) Etapa 2 – Quantificação do volume de água utilizado e de lodo gerado nas operações de lavagem dos filtros e descargas dos decantadores.

- Etapa 2a – Os dados referentes ao ano de 2021, tanto da estação seca como chuvosa, foram obtidos a partir do Relatório de Informações Operacionais (RIO), da Gerência de Produção Metropolitana Leste da COMPESA. Esse relatório contém a quantificação das médias mensais dos volumes gastos com água da lavagem de filtros (ALAF) e descarga de Decantadores (DD).
- Etapa 2b - A massa de lodo produzida foi quantificada através do cálculo de balanço de massa, que é a quantificação recomendada para estações de tratamento que já estão em operação, como é o caso da ETA Tapacurá (Equações 1 a 7). Neste cálculo, considera-se a entrada de sólidos no sistema como aquela fornecida pelas partículas presentes na água bruta e nos produtos químicos adicionados ao seu processo (ANDREOLI, 2013).

Determinação da dosagem de coagulante expressa como mg Al^{+3} /L

$$D_{Al} = \frac{D_{sal} * 54}{102} \quad (1)$$

Em que:

D_{Al} = dosagem de coagulante expresso como Al^{+3} ($mg\ Al^{+3}\ /L$);

D_{sal} = dosagem do coagulante expressa como sal ($mg\ Al_2O_3$).

Cálculo de produção de lodo na ETA

Admitindo-se 2 águas de hidratação (valor intermediário), tem-se:

$$P_L = Q * (4,22 * D_{Al} + SST) * 10^{-3} \quad (2)$$

Em que:

P_L = produção de lodo na ETA em kg/dia;

Q = vazão da água bruta em m^3/dia ;

D_{al} = Dosagem de sais de alumínio, expresso como Al em mg/L;

SST = Sólidos suspensos totais presentes na água bruta (mg/L).

Cálculo de balanço de massa para unidade de sedimentação

$$Q_{s,dec} = \frac{Q_{s,a} \cdot TC}{100} \quad (3)$$

Em que:

TC (%) = Taxa de captura de sólidos da unidade de sedimentação (%);

$Q_{s,a}$ = Vazão sólida afluyente á unidade de sedimentação (kg/dia);

$Q_{s,dec}$ = Vazão sólida do lodo efluyente da unidade de sedimentação.

$$Q_{s,e} = Q_{s,a} - Q_{s,dec} \quad (4)$$

Em que:

$Q_{s,e}$ = Vazão sólida efluyente da unidade de sedimentação e afluyente ás unidades de filtração (kg/dia).

$$Q_{l,lodo} = \frac{100 * Q_{s,dec}}{TS (\%) * \rho_{lodo}} \quad (5)$$

Em que:

$Q_{l,odo}$ = Vazão líquida do lodo efluente a unidade de sedimentação e afluyente ao tanque de equalização de lodo (m³/dia);

ρ_{lodo} = Massa específica do lodo (kg/m³).

$$Q_{l,e} = Q_{l,a} - Q_{l,od} \quad (6)$$

Em que:

$Q_{l,e}$ = Vazão líquida efluente da unidade de sedimentação e afluyente ás unidades de filtração (m³/dia);

$Q_{l,a}$ = Vazão líquida afluyente á unidade de sedimentação (m³/dia).

Cálculo de balanço de massa para unidade de filtração

$$Q_{l,e} = Q_{l,a} - V_{\acute{a}gua} \quad (7)$$

Em que:

$Q_{l,e}$ = Vazão líquida efluente da unidade de filtração correspondente a vazão de água tratada (m³/dia);

$Q_{l,a}$ = Vazão líquida afluyente á unidade de filtração (m³/dia).

b) Etapa 3 – Caracterização do lodo gerado nas operações de lavagem dos filtros e descargas dos decantadores

A caracterização do lodo produzido na ETA Tapacurá foi realizada pelo laboratório de esgoto e pelo laboratório de absorção atômica, ambos da COMPESA, conforme apresentado no quadro 9. Mesmo não constando na Resolução CONAMA 430/2011, as análises de sólidos suspensos totais, e DQO, foram realizadas, pois são parâmetros determinantes para dosagens de produtos e conhecimento da biodegradabilidade dos resíduos.

Quadro 9 - Análises realizadas com o lodo da Estação de Tratamento de Água Presidente Castelo Branco, com seus respectivos métodos e equipamentos (APHA, 2017)

Análise	Método	Equipamento
Metais	Técnica 3500 Al - B	ICP – Espectro de emissão de plasma
pH	Técnica 4500 H+-B	pHmetro – QUIMIS
Sólidos Sedimentáveis	Técnica 2540 F	Cone <i>Imhoff</i>
Sólidos Suspensos	Técnica 2540 D	Funil de <i>Buchner</i> /Estufa/Balança
Sólidos Totais	Técnica 2540 B	Estufa/Balança analítica
Sólidos Totais Dissolvidos	Técnica 2540 C	Estufa/Mufla/Balança analítica
Sólidos Totais Fixos	Técnica 2540 E	Estufa/Mufla/Balança analítica
Sólidos Totais Voláteis	Técnica 2540 E	Estufa/Mufla/Balança analítica
Demanda Química de Oxigênio	Técnica 5220 D	Digestor e Espectrofotômetro
Demanda Bioquímica de Oxigênio	Técnica 5220 B	Oxitop (oxímetro)/Incubadora
Turbidez	Técnica 2130 B	Turbidímetro 2100P HACH

Fonte: COMPESA (2021)

c) Etapa 4 – Determinação da resistência específica (re) do LETA e ensaios de tratabilidade para definição da aplicação do polímero, definição dos gradientes de floculação e taxa de aplicação superficial (TAS), análise do teor de sólido adensado.

- Etapa 4 a – Determinação da resistência do LETA da ETA Tapacurá: Foi realizada no laboratório de resíduos da COMPESA. Para o ensaio de Resistência Específica foi utilizada a metodologia baseada no ensaio de tempo de filtração, com bomba de vácuo e suporte de filtração. Devido à dificuldade de obtenção de volumes maiores de material, foi utilizado o teste da resistência específica conforme adaptado por Scalize e Di Bernardo (1999), com base no teste do tempo de filtração constante na 21ª edição do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* publicado pela APHA 2017. O LETA adensado pode ser de fácil ou difícil desidratação, sendo a RE um fator importante para essa determinação pois possibilita a escolha apropriada do polímero e a seleção dos dispositivos para desaguamento (GUIMARÃES *et al.*, 2019). Quanto menor a RE, mais fácil a desidratação; para reduzi-la, tornando-se necessário seu condicionamento, que pode ser químico, físico ou biológico (SAMPAIO; RIBEIRO; DANTA, 2021). A RE (calculada pela equação 8) é o parâmetro usado para avaliar a passagem do líquido através de uma massa sólida, a qual depende de diversos fatores, especialmente o uso e tipo de polímero a ser empregado: quanto menor o valor da RE, mais difícil será a retirada do lodo. Os valores de resistência específica podem variar

consideravelmente. Em geral, lodos com resistência específica de até 1×10^{12} m/kg são considerados de fácil desidratação, enquanto aqueles com resistência específica acima de 10×10^{12} m/kg têm baixa desidratabilidade (RITCHER, 2001).

$$r = \frac{2 \times b \times A^2}{\mu \times C} \quad (8)$$

Em que:

r = resistência específica (cm/g)

P = pressão de filtração (g/cm. S²)

A = área filtrante (cm²)

μ = Viscosidade do filtrado (g/cm.s)

C = massa de SST por unidade de volume do filtrado (g/cm³)

B = coeficiente (s/cm⁶ ou s/mL²)

Os equipamentos e materiais necessários e materias utilizados no teste de resistência específica foram: Funil de buchner nº2; bomba de vácuo (380 mm Hg); cronômetro; medidor de vácuo (manômetro); proveta graduada de 25 mL; papel de filtro whatman n.42; magueira para ligar a proveta ao sistema de vácuo, figura 18.

Figura 18 - Conjunto de equipamentos para ensaio de Reistência Específica



Fonte: Autor (2023)

- **Etapa 4 b** – Ensaio de tratabilidade: Os ensaios de tratabilidade foram realizados no equipamento Flotatest para a avaliação dos polímeros e definição da melhor carga e peso molecular, das melhores dosagens. Para a definição dos gradientes a serem aplicados e TAS, o equipamento utilizado foi o Flotador de bancada com seis jarros calibrados, na figura 19 é apresentado um jarro com os detalhes do fundo falso, e com marcação da taxa de recirculação padrão que vai até 20%, figura 20, composto de torre de saturação, cubas com capacidade para 2000 mL, filtro de ar com manômetro com capacidade de até 10 kgf/cm², conexões de encaixe rápido e válvula agulha de saída com água saturada para os jarros que possuem difusores para melhor distribuição da água saturada e massa líquida (Figura 20) conforme figura 20.

Figura 19 - Jarros calibrados para dispersão uniforme da água saturada

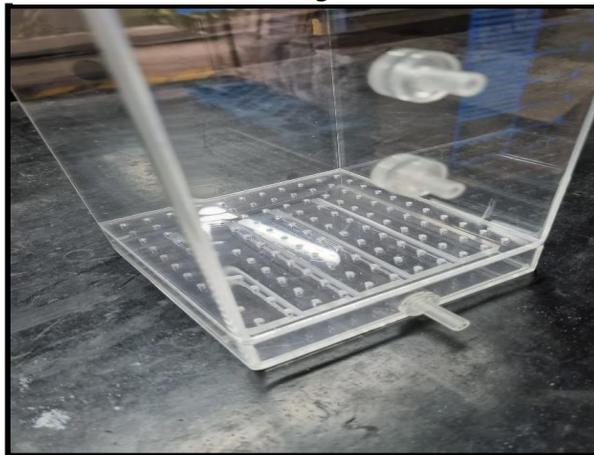


Figura 20 - Jarros calibrados para dispersão uniforme da água saturada



O polímero utilizado nos testes foi o polímero catiônico - Polydadmac - De alta carga e baixo peso molecular.

A solução utilizada nos testes foi uma solução a 2%, preparada com rotação de 100 RPM, estabelecida para evitar a quebra da cadeia formada. As dosagens foram utilizadas entre 0,5 a 3,0 mg pol/g SST (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0). A aplicação e mistura do polímero nos ensaios de adensamento foram realizados em Flotatest, com mistura rápida igual para todos os testes, com 5 segundos a 500 RPM (posterior a adição do polímero), mais agitação lenta.

Nos ensaios, utilizou-se o flotatest, equipamento de flotação por ar dissolvido em escala de bancada com capacidade de 2 litros. A torre de saturação de bancada era ligada a um compressor, que realizava a injeção de ar comprimido no interior do saturador para que a água fosse saturada. A pressão foi controlada através de manômetro e pela válvula tipo agulha, a qual transportava o ar que saía do saturador para modulação da pressão. Após a saturação da água, a válvula de saída liberava o fluido e a água saturada com microbolhas de ar entrava em contato com a amostra. As pressões de saturação foram 0,5; 0,55 e 0,6 Mpa (5; 5,5 e 6 atm.) e a Taxa de Recirculação (R) de 30% a 40%.

Para determinação da TAS desejada, utilizou-se o melhor resultado do Flotatest e foram aplicadas as velocidades: 8 cm/min – 10 cm/min – 15 cm/min – 19 cm/min -21,6 cm/min. Diversas experiências no tratamento de água e do LETA geraram resultados satisfatórios com taxas de aplicação superficial na faixa de 100 a 300 m³/m².dia, que correspondem a velocidades ascensionais de flotação de 7,2 a 21,6 cm/min (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

A duração do ensaio de adensamento por FAD, foi de, aproximadamente, 20 minutos. Os gradientes de floculação foram testados no tratamento do lodo em velocidades decrescentes (50-100 S⁻¹) e temperatura de 27C°. A relação gradiente e temperatura, tabela 2 e figura 21, são variáveis importantes para definição dos parâmetros de floculação e interferem diretamente na formação e quebra de flocos.

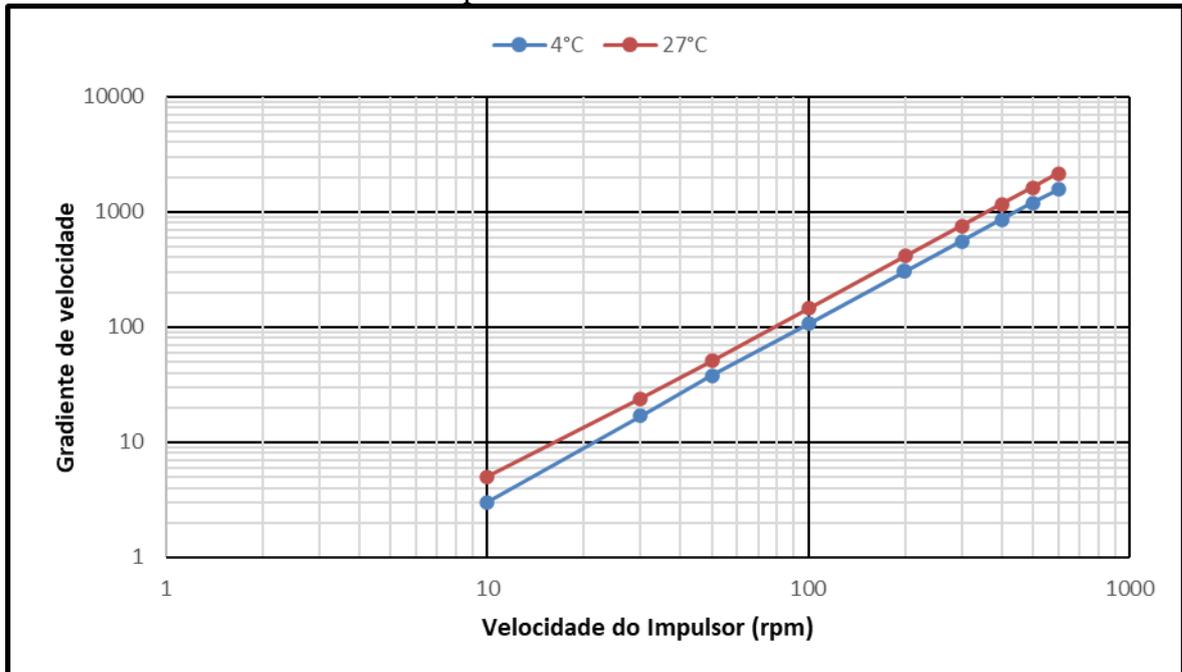
Tabela 2 - Gradiente de velocidade e temperatura dos ensaios de tratabilidade em Flotatest

Tabela de gradiente de velocidade (S ⁻¹)									
RPM	Temperatura da água °C								
	0°C	4°C	10°C	16°C	21°C	27°C	32°C	35°C	40°C
10	3	3	4	4	4	5	5	5	5
30	16	17	19	21	22	24	25	25	26
50	35	38	41	44	47	51	54	55	55
100	100	106	116	125	134	145	152	154	156
200	283	301	328	353	378	411	429	436	442

300	521	552	603	649	695	754	788	801	812
400	802	850	929	999	1070	1162	1213	1234	1249
500	1120	1188	1298	1396	1495	1623	1695	1724	1746
600	1473	1562	1706	1835	1965	2134	2228	2267	2295

Fonte: Autor (2023)

Figura 21 - Gradiente de velocidade do Flotatest em função da velocidade do impulsor nas temperaturas de 4°C e 27°C.



Fonte: Autor (2023)

d) Etapa 5 – Verificar os parâmetros do projeto mais eficientes na redução das variáveis de qualidade do LETA.

Nessa etapa, foram definidas as vazões de projeto (0,54 L/s), a taxa de recirculação R, conforme a equação 9 e a relação Ar/Sólido - A/S utilizando a equação 10, que foram aplicadas nos ensaios na ETEF.

$$R = \frac{Q_{\text{rec}}}{Q_{\text{af}}} \times 100 \quad (9)$$

Em que:

R= Taxa de recirculação (%)

Q_{rec} = Vazão de água recirculada (m^3/s)

Q_{af} = Vazão de resíduo (m^3/s)

$$A/S = \frac{1,3 A_s (f P_{abs} - 1) R}{S_s Q} \quad (10)$$

Em que:

A/S é a relação ar-sólido em $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$;

A_s é a solubilidade do ar, em $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$;

f é a fração de gás dissolvido a uma dada pressão, usualmente 0,5 a 1,0;

P_{abs} é a pressão absoluta em atmosferas;

S_s é a concentração de sólidos em suspensão totais em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

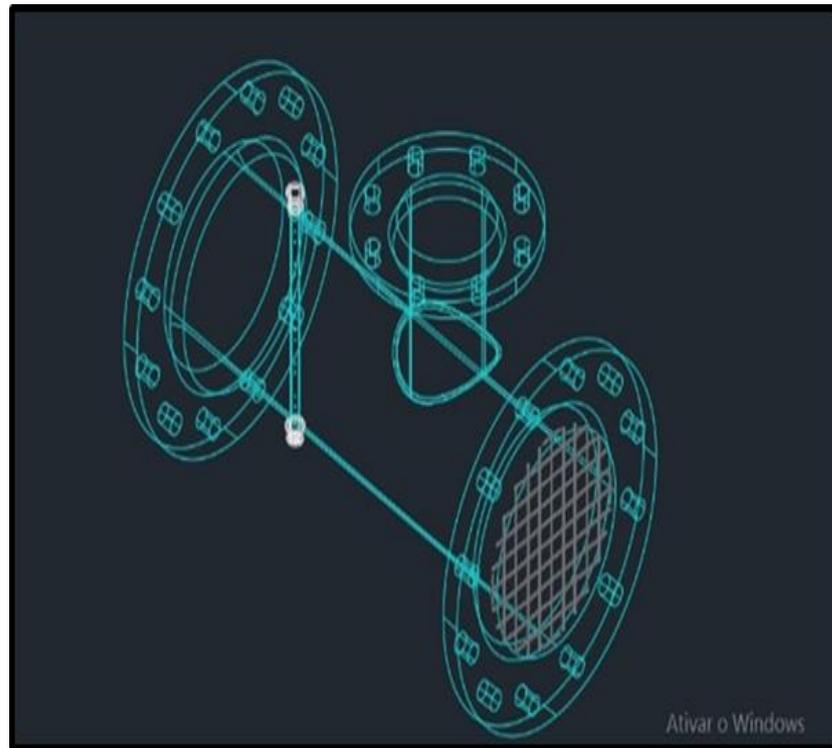
Q é a vazão em $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$;

R é a taxa de recirculação (%).

A ETEF proposta é uma unidade piloto com tecnologia de tratamento de flocladores de bandeja associado a Flotação por Ar Dissolvido - FAD, sendo esta modular, pré-fabricada em resina poliéster estruturada com fibra de vidro. O bloco hidráulico é composto pelas seguintes etapas distintas: dispositivo de mistura rápida, floclação, flotação em bandejas e o flotador. Além do bloco hidráulico, estão sendo apresentados sistemas de produtos químicos para aplicação de polímeros e alcalinizante. O processo de tratamento, propriamente dito, inicia-se com a aplicação de polímero na etapa de mistura rápida, floclação seguindo para zona flotação.

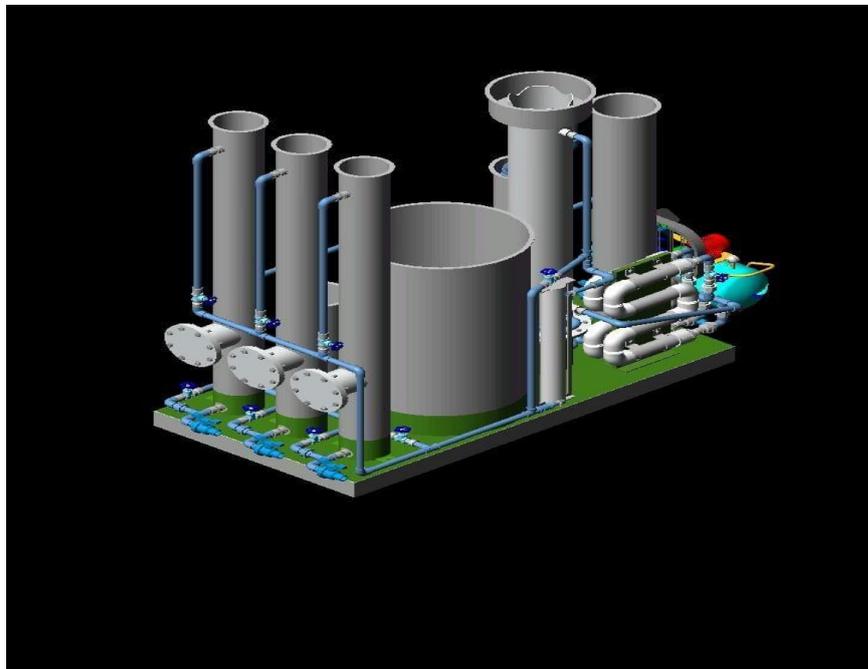
O LETA da ETA Tapacurá é transportado para dois tanques de 1 m^3 de polietileno, figura 26, seguindo para ETEF piloto, figura 24, onde a água passa por um mecanismo de floclação, interno à tubulação (uma grade de barras dimensionada com gradiente de 500 rpm) conforme apresentado na figura 23. O contato brusco da água realiza a mistura rápida necessária à coagulação.

Figura 23 - Mecanismo de mistura rápida para floculação



Fonte: Autor (2023)

Figura 24 - FFAD – Floco flotador por ar dissolvido Piloto



Fonte: Autor (2023)

Figura 26 – Tanques de 1 m³ para alimentar o Floco- Flotador por Ar dissoldido - FFAD



Fonte: Autor (2023)

Em seguida, a água passa ao floculador hidráulico de bandejas, em (polímero reforçado com fibra de vidro) PRFV, com gradientes de velocidade conforme o melhor resultado encontrado no teste de tratabilidade. São três floculadores, cada um com três bandejas por floculador (a vazão de entrada de 0,18 L/s por floculador), que é a concepção indicada para floculação para flotação do LETA, seguindo para o tanque flotação onde ocorre a separação sólido-líquido. A saída da água clarificada diferentemente dos decantadores, é feita no fundo do tanque de flotação. A remoção do lodo é realizada de forma hidráulica na parte superior do tanque flotação, aproveitando a ação do movimento da água; o lodo é coletado por gravidade pelo vertedor triangular e arrastado pela rampa, sem o risco de de ter um arraste excessivo de água comprometendo a concentração de lodo.

Para o dimensionamento do floculador de bandejas foram utilizadas as seguintes equações:

Diâmetro mínimo

Tempo de floculação mínimo ($T_{fl.mín}$)

Volume útil mínimo:

$$(V_{mín}) = Q_{ETA} \times T_{fl.mín} / 60 \quad (11)$$

Área mínima para cada unidade

$$(A_{\text{mín}}) = V_{\text{mín}} / H_{\text{útil}} / N^{\circ}_{\text{unid}} \quad (12)$$

Diâmetro mínimo calculado:

$$(D_{\text{mín}}) = (A_{\text{mín}} \times 4/3,1415)^{(1/2)} \quad (13)$$

Tempo de floculação resultante

Diâmetro adotado (D_{adot})

Área de cada floculador:

$$(A_{\text{FBH}}) = (3,1415 \times (D_{\text{adot}})^2) / 4 = 0,03 \text{ m}^2 \quad (14)$$

Altura útil da câmara ($H_{\text{útil}}$)

Volume útil de cada FBH:

$$(V_{\text{útil}}) = A_{\text{FBH}} \times H_{\text{útil}} \quad (15)$$

Nº de unidades (N°_{unid})

$$V_{\text{útil total}} = V_{\text{útil}} \times N^{\circ}_{\text{unid}} \quad (16)$$

Tempo de floculação resultante:

$$(T_{\text{fl.res.}}) = V_{\text{utotal}} / Q_{\text{ETA}} \times 60 \quad (17)$$

A vazão em cada orifício é dada por:

$$Q_0 = Q_{\text{REGULARIZAÇÃO}} / N^{\circ}_{\text{ORIFÍCIOS}} \quad (18)$$

Em que:

Q_0 vazão em cada orifício (m^3/s)

Q_{regul} vazão de regularização (m^3/s)

N°_{orif} número de orifícios

O número de Reynolds (Re) é dado pela expressão:

$$Re = V_0 D_0 / \nu \quad (19)$$

Em que:

V_o velocidade no orifício (m/s)

D_o diâmetro do orifício (m)

ν viscosidade cinemática da água (m²/s)

O gradiente médio de velocidade foi calculado por:

$$G_m = \frac{d_o}{S_o} \sqrt{\frac{\pi V_o^3}{8 \nu C_d^2 X_o}}$$

(20)

Em que:

C_d coeficiente de descarga (0,61)

S_o espaçamento entre orifícios (m)

d_o diâmetro dos orifícios (m)

V_o velocidade média de escoamento dos orifícios (m/s)

ν viscosidade cinemática da água (m²/s)

X_o alcance dos jatos (m)

Após esta unidade, a água floculada segue para o flutador por ar dissolvido. Em tal câmara, ocorre a adesão das bolhas de ar, presentes na água saturada, aos flocos fazendo-os flotar. A água saturada com ar é distribuída no fundo da calha do flutador. Sua aplicação é controlada, de forma a impedir a ocorrência de jato, que poderia originar bolhas grandes e quebra dos flocos. Neste ponto, ocorre a despressurização de água de recirculação, tendo início o processo de flotação. A água é misturada ao ar por meio de torres com geometria de serpentinas de saturação com diâmetro de 63 mm, sendo a taxa de recirculação cerca de 40% de vazão tratada conforme determinado no ensaio de bancada, trabalhando a uma pressão absoluta de até 7,0 Kgf/cm². Em um ambiente fechado, como vasos pressão e canalizações, as concentrações de núcleos de ar são muito grandes, e, portanto, resulta uma taxa de coalescência elevada, podendo formar bolhas de grande diâmetro, deste modo é importante que o ar seja liberado o mais próximo possível da corrente de água floculada, evitando-se o transporte das microbolhas do ponto de quebra de pressão até o ponto de aplicação por uma canalização, sendo ideal que a válvula de aplicação seja instalado na zona de entrada da água floculada (RICHTER, 2001), foi instalada um regulador tipo agulha, figura 22, na entrada da água

floculada para evitar a formação dessas bolhas de grande diâmetro, formadas por coalescência e comprometer o tratamento.

Figura 22 - Regulador tipo agulha



Fonte: Autor (2023)

O sistema de flotação foi dimensionado conforme as seguintes sequências de equações:

Taxa de aplicação na flotação resultante:

Diâmetro adotado (D_{adot})

Área de cada flotador

$$(A_{FLT}) = (3,1415 \times (D_{adot})^2) / 4 \quad (21)$$

Nº de unidades (Nº_{unid})

Área total dos flotadores

$$(A_{t \text{ FLT}}) = A_{FLT} \times N^{\circ} \text{unid} \quad (22)$$

Taxa de flotação em operação normal (Tflot.)

$$T_{flot.} = Q_{ETEF} \times 24(h) / A_{iFLT} \quad (23)$$

Sistema de saturação

Bombas de Recirculação:

Taxa de água recirculada (r)

Vazão de água recirculada

$$(Q_r) = Q_{ETA} \times (r/100) \quad (24)$$

Compressores de Ar:

Vazão dimensionamento da ETA (Q_{ETA}) (L/s)

Taxa de água recirculada (r)

Equação 25 - Vazão de água recirculada (Q_r) = Q_{ETA} x (r/100) (L/s)

Temperatura da água (T) = 27 °C

Constante da lei de Henry (K_H) = 21,4 mg/L

Densidade do ar saturado de vapor d'água (ρ) = 1179,7 mg/L

Pressão de operação (P) = 5 - 7 bar

Serpentina de Saturação:

Vazão de água recirculada (Q_r) (m³/h)

Tempo de detenção referencial (T_d)

Equação 26 - Volume da serpentina (V) = Q_r/T_d

Ao introduzir ar e água na câmara de saturação a uma pressão absoluta P, o ar se dissolve na água até uma concentração de saturação (C_{satp}) de acordo com a Lei de Henry.

$$C_{satp} = K_H P$$

Em que:

- C_{satp} : concentração de saturação do ar na câmara de saturação na pressão P (mg/l);
- K_H: constante da lei de Henry, em função da temperatura do ar (mg/l atm ou mg/l kpa);
- P: pressão absoluta no interior da câmara de pressurização.

Determinação teórica dos diâmetros das microbolhas:

$$\text{Equação 27 - } D_{bi} = \frac{4 \times \sigma}{\Delta P}$$

Em que:

- D_{bi} = Diâmetro inicial das micro-bolhas (m);
- ΔP = Diferença de pressão nos orifícios de escoamento de água pressurizada (N/m²);
- σ = Tensão superficial da água (N/m)

Determinação teórica da quantidade de microbolhas de ar por m³ de ar na mistura:

A pressão atmosférica em um local qualquer pode ser estimada a partir da equação 27

$$\text{Equação 28 - } P_{atm} = \frac{13,6 \times (760 - 0,081 \times Z)}{10000}$$

Em que:

- P_{atm} = Pressão atmosférica em atm,
- Z = Altitude do local

Quando o ar é introduzido na câmara de saturação contendo água a uma pressão absoluta P , o ar se dissolve na água até uma concentração de saturação C_{sat} conforme equação 28

$$\text{Equação 29 - } C_{sat} = H \times f \times P_{abs}$$

Em que:

- C_{sat} = Concentração de saturação na câmara de saturação (mg/l);
- P_{abs} = Pressão absoluta no interior da câmara de pressurização, igual á pressão relativa somada á pressão atmosférica (atm ou kPa)
- f = Eficiência na câmara de saturação (0,5 á 0,9)
- H = Constante da Lei Henry, em função da temperatura do ar.

O controle de fluxo de ar, é realizado por meio de rotâmetro que resulta na equação 29;

$$\text{Equação 30 - } F_{ar} = Q_r \times H \times (f \times P_{abs} + 1)$$

Em que;

- F_{ar} = Fluxo de ar mg ar/s;
- Q_r = Vazão de recirculação em m/s;
- f = Eficiência na câmara de saturação (0,5 á 0,9);
- H = Constante da Lei Henry, em função da temperatura do ar;

- P_{abs} = Pressão absoluta no interior da câmara de pressurização, igual á pressão relativa somada á pressão atmosférica (atm ou kPa).

O número de bolhas na zona de mistura é estimado, por unidade de volume pode ser estimado a partir da equação 30 e 31 (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017);

Equação 31 - $C_{ar} = \frac{C_{mis}}{m_{satlocal}}$

$m_{satlocal}$

Em que:

- C_{ar} = Concentração de ar na zona de mistura (L ar /L água);
- C_{mis} = Concentração de ar na zona de mistura (mg ar /L água);
- $m_{satlocal}$ = Massa específica do ar na altitude (mg ar /L ar);

Equação 32 - $N_b = \frac{6 \times C_{ar}}{\pi \times D_b^3}$

$\pi \times D_b^3$

Em que:

- N_b = Número de bolhas de ar por volume de água (m^3);
- D_b = Diâmetro inicial das microbolhas (m);
- C_{ar} = Concentração de ar na zona de mistura (L ar /L água);

Após a mistura da água pressurizada começa a formação do manto de lodo, removido periodicamente por controle de nível e válvulas, extravasando no topo do flotor para a calha coletora. As unidades da estação de tratamento, e acessórios, foram dimensionadas obedecendo a norma NBR 12216 Projeto de Estações de Tratamento de Água da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), bem como nos estudos do Programa de Saneamento Básico Brasileiro (PROSAB).

As leis que regem o fenômeno de flotação são análogas às que regem os processos de sedimentação de sólidos granulares, com a diferença de que se efetuam em sentido inverso. A relação vazão afluente/área do tanque de flotação é conhecida como TAS ou Taxa de Escoamento Superficial, e é usualmente dada em $m^3/m^2 \cdot dia$. A TAS adotada é numericamente igual, no caso da flotação, à velocidade de subida das microbolhas consideradas no projeto. Para dimensionamento da Bacia de Flotação foi utilizada uma TAS de $273,6 m^3/m^2 \cdot dia$, valor encontrado no teste de tratabilidade e situado na faixa recomendada para a FAD (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Desta forma, a câmara de flotação foi calculada

para a vazão de 0,54 L/s, tendo uma área de 0,20 m², com as seguintes dimensões: 0,5 m de diâmetro e profundidade de 1,80 m, profundidade essa considerada adequada para o processo (SHI et al., 2017). O comprimento máximo da câmara de flotação tem sido limitado a 20 m, pois, para valores maiores, existe a possibilidade de o lodo não permanecer na superfície até ser raspado. Em geral, considera-se uma relação máxima (comprimento/profundidade) igual a 4 (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017), ou seja, para uma profundidade de 1,80 m, o diâmetro de 0,5 m apresentado no projeto atende as recomendações.

Os ensaios na unidade piloto, e avaliação do teor de sólidos adensados foi realizado conforme *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd Edition, 2017, Método 2540 B. O floco-fotador foi dimensionado utilizando os dados obtidos nos ensaios de tratabilidade. Foram realizados 6 ensaios na planta piloto instalada na ETA Tapacurá; cada experimento levou em consideração a aplicação da dosagem de polímeros variando de 0,5 a 3,0 mg pol/g SST. Para cada dosagem, foram testadas as pressões de 5,0 - 5,5 - 6,0 atm, a taxa de recirculação foi de 40%, e a taxa de aplicação superficial 19 cm/min. As análises do clarificado foram realizadas pelo laboratório da GQL, na COMPESA. O sistema de dosagem de produtos químicos foi dimensionado para atender a aplicação de polímeros com baixa, média e alta viscosidade com bombas dosadoras de recuo com mola, figura 23.

A equação 32 foi utilizada para determinação da vazão de dosagem foi:

$$\text{Vazão de dosagem (qdos.)} = (\text{Qméd} \times \text{Dprod}) / (10 \times \text{Csol}) / (\text{Cprod} / 100) \quad (32)$$

Figura 23 - Equipamentos para dosagem de produtos químicos na entrada do floculador em bandejas do FFAD



Fonte: Autor (2023)

- e) **ETAPA 6 – Verificar se as variáveis de qualidade da água clarificada estão de acordo com os padrões de lançamento de efluentes ou integração á agua bruta no inicio da ETA conforme Resolução CONAMA nº 430/2011.**

A avaliação foi realizada conforme a Resolução CONAMA nº 430/11 que dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para lançamento de efluentes em corpos de água. Foram realizadas as seguintes análises: turbidez, cor, sólidos suspensos totais (SST), Alumínio, ferro, manganês, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e teor de sólidos no lodo adensado. Todas as análises foram realizadas no laboratório GQL, na COMPESA.

- f) **ETAPA 7 – Avaliar as possibilidades de disposição final do LETA oriundo da ETA Presidente Castello Branco.**

A avaliação foi realizada levando em consideração os teores de sólidos obtidos no processo de adensamento na unidade piloto e o requerido pelas tecnologias de desague existentes no mercado. A disposição final do lodo representa um elevado custo na operacional de uma ETA. Geralmente para destinação final do lodo são utilizados os aterros sanitários, no entanto, alguns estudos vislumbram sua aplicação como insumo agrícola, fertilizante ou mesmo na construção civil. Diante da necessidade de preservação ambiental ao se destinar corretamente os resíduos sólidos resultantes do tratamento de esgoto, surge o desafio de encontrar formas economicamente viáveis e

ecologicamente seguras para reutilizar o lodo, reintegrando um produto de descarte ao ciclo produtivo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

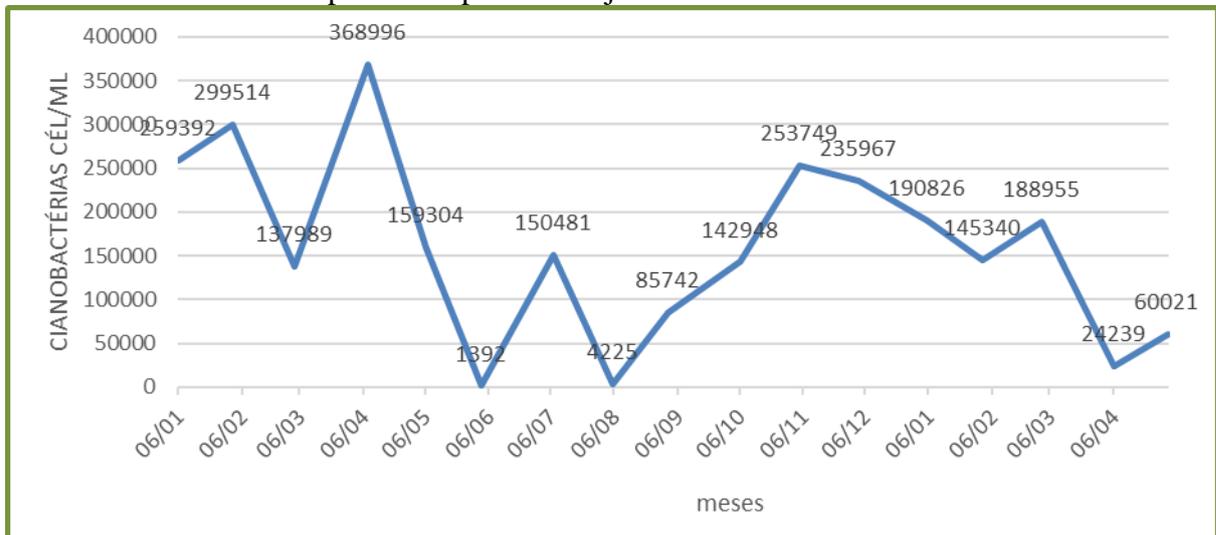
5.1 A BACIA HIDROGRÁFICA E A UNIDADE PILOTO NA ETA TAPACURÁ

5.1.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica de Tapacura

A bacia do Rio Tapacurá, afluente principal do Rio Capibaribe, e do reservatório de Tapacurá manancial com a maior contribuição de água bruta para ETA, tem uma grande deterioração da qualidade da água devido a poluição por esgotos domésticos e por efluentes da indústria açucareira. Manifestam-se os seguintes problemas sérios de qualidade de água: alto nível trófico, crescimento excessivo de algas e ocorrência de cianobactérias, entre elas a *Raphidiopsis* (= *Cylindrospermopsis*), *Geitlerinema*, *Merismopedia* e *Pseudanabaena*.

Raphidiopsis é um dos gêneros mais comuns no Estado de Pernambuco e é caracterizado por apresentar organismos filamentosos, potencialmente produtores das cianotoxinas (cilindrospermopsina, saxitoxinas e microcistinas). *Geitlerinema* e *Merismopedia* também são gêneros comumente encontrados nos ecossistemas de água doce de Pernambuco. Possuem morfologia filamentosa e colonial, respectivamente, e não são reconhecidas como potencialmente tóxicas (MÉJEAN *et al.*, 2016). As densidades destas cianobactérias no mês de abril de 2021 nas águas da Barragem Tapacurá podem ser visualizadas no Quadro 10. Conforme observado na figura 24, a densidade de cianobactérias na Barragem Tapacurá esteve acima de 10.000 cél/mL durante o período de janeiro/2021 a abril/2022, exceto nos meses de junho e agosto/2021. As análises mostram que uma fração da densidade destes organismos é ocupada por espécies filamentosas, tais como *Raphidiopsis* (*Cylindrospermopsis*) e *Geitlerinema* com concentrações elevadas de cianobactérias que comprometem a eficiência nas operações unitárias da ETA, e conseqüentemente aumenta o grau de complexidade do tratamento a ser aplicado nos resíduos gerados na ETA. Os problemas vão desde o gasto elevado de produtos químicos, geração de mais lodo, dificuldade na operação de decantação; caso sejam espécies que produzam aerótopos (*Raphidiopsis*), aumentam o pH, dificultando o processo de coagulação. Como a maioria tem características de algas filamentosa, ocorre a comatação dos filtros, reduzindo as carreiras de filtração e como consequência gasta-se mais água para as retrolavagens, além de produção de cianotoxinas, no caso de *Raphidiopsis*.

Figura 24 – Acompanhamento da densidade de cianobactérias nas águas da Barragem Tapacurá no período de janeiro/2021 a abril/2022



Fonte: (COMPESA, 2021)

Quadro 10 – Acompanhamento das análises hidrológicas da Barragem de Tapacurá / abril 2021

ENSAIOS	RESULTADOS	UNIDADE DE MEDIDA	MÉTODO	DATA	LABORATÓRIO
Cianobactérias*	368996	Células/mL	Microscopia - 10200F - SMEWW - 22 - 2012	12/04/21	GQL/COMPESA
<i>Cylindrospermopsis</i> sp.	103449	Células/mL	Microscopia - 10200F - SMEWW - 22 - 2012	12/04/21	GQL/COMPESA
<i>Geitlerinema</i> sp	111827	Células/mL	Microscopia - 10200F - SMEWW - 22 - 2012	12/04/21	GQL/COMPESA
<i>Merismopedia</i> sp.	147735	Células/mL	Microscopia - 10200F - SMEWW - 22 - 2012	12/04/21	GQL/COMPESA
<i>Pseudanabaena</i> sp.	5985	Células/mL	Microscopia - 10200F - SMEWW - 22 - 2012	12/04/21	GQL/COMPESA

Fonte: Laboratório de hidrobiologia Gerência de controle de qualidade (COMPESA, 2021)

*A nomenclatura Cianobactérias geralmente é usada (sem distinção de espécie) quando não conseguimos a identificação perfeita da espécie.

5.1.2 ETAPA 1b - Localização na bacia Hidrográfica da Barragem Tapacurá.

As figuras 25 e 26, apresentam a localização geográfica da Barragem Tapacurá e os municípios que contribuem diretamente com aporte de esgoto doméstico para o ecossistema, o que pode favorecer a eutrofização do manancial e a proliferação de cianobactérias. Na Figura

27 e 28 são apresentados os tipos de solo e o uso e ocupação dentro da bacia hidrográfica do Rio Tapacurá. Em suas margens, é possível perceber intensa agricultura, que atua como fonte de contaminação por agrotóxicos e fertilizantes, lixiviando nutrientes como fósforo e nitrogênio que também favorecem o crescimento de cianobactérias e outros organismos fitoplanctônicos.

Figura 25 - Localização geográfica da barragem Tapacurá (Pernambuco, Brasil)



Fonte: Google Earth (2023)

Figura 26 – Municípios de Pernambuco que se localizam nas margens da Barragem Tapacurá

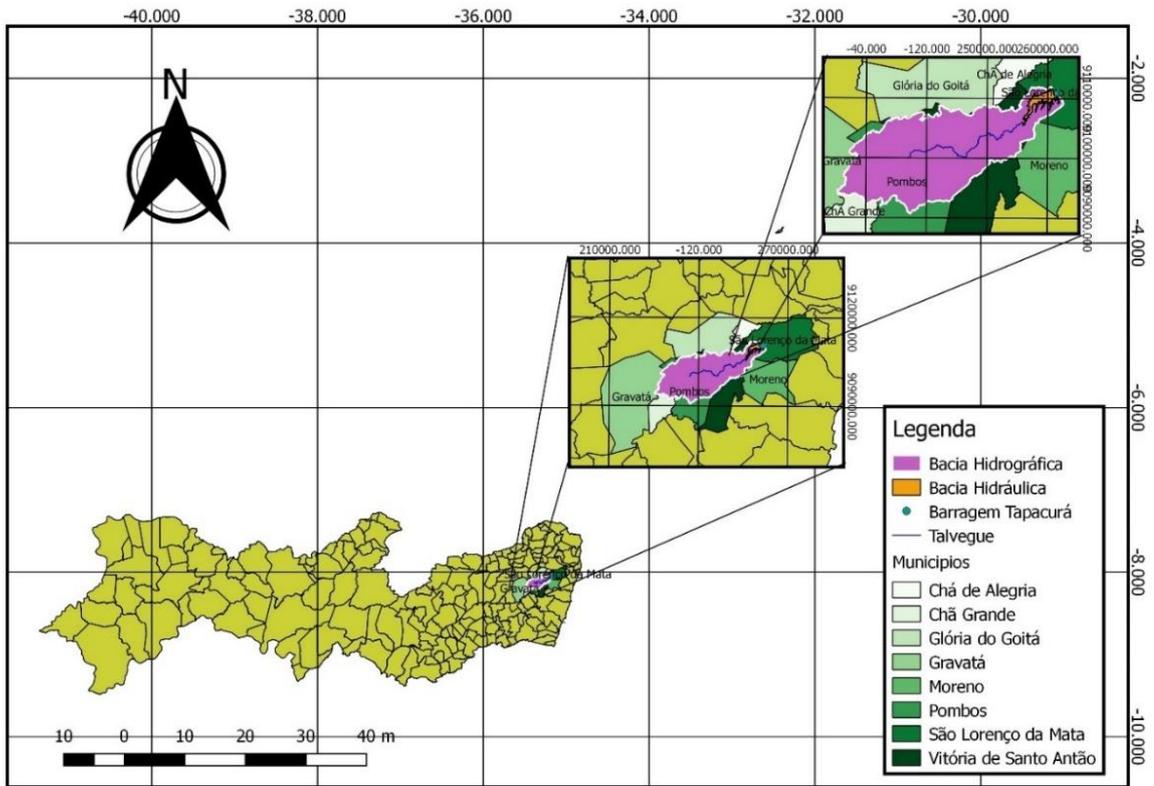


Figura 27 – Tipos de solos da bacia hidrográfica da Barragem Tapacurá

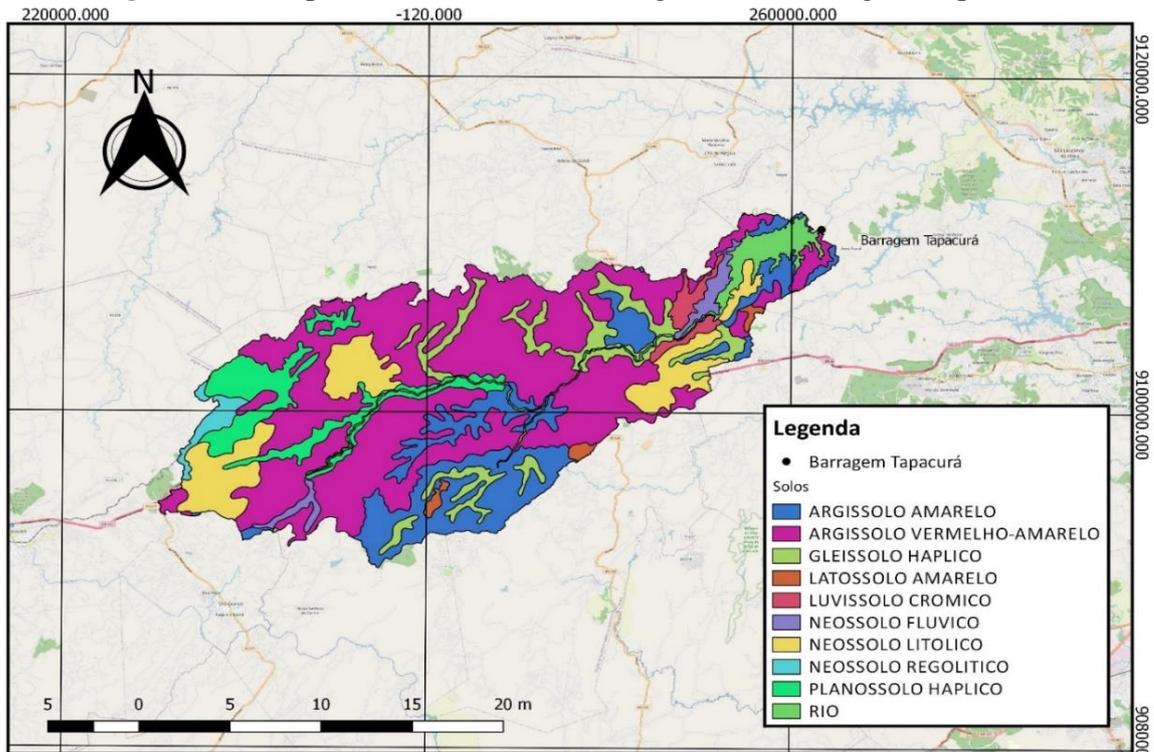
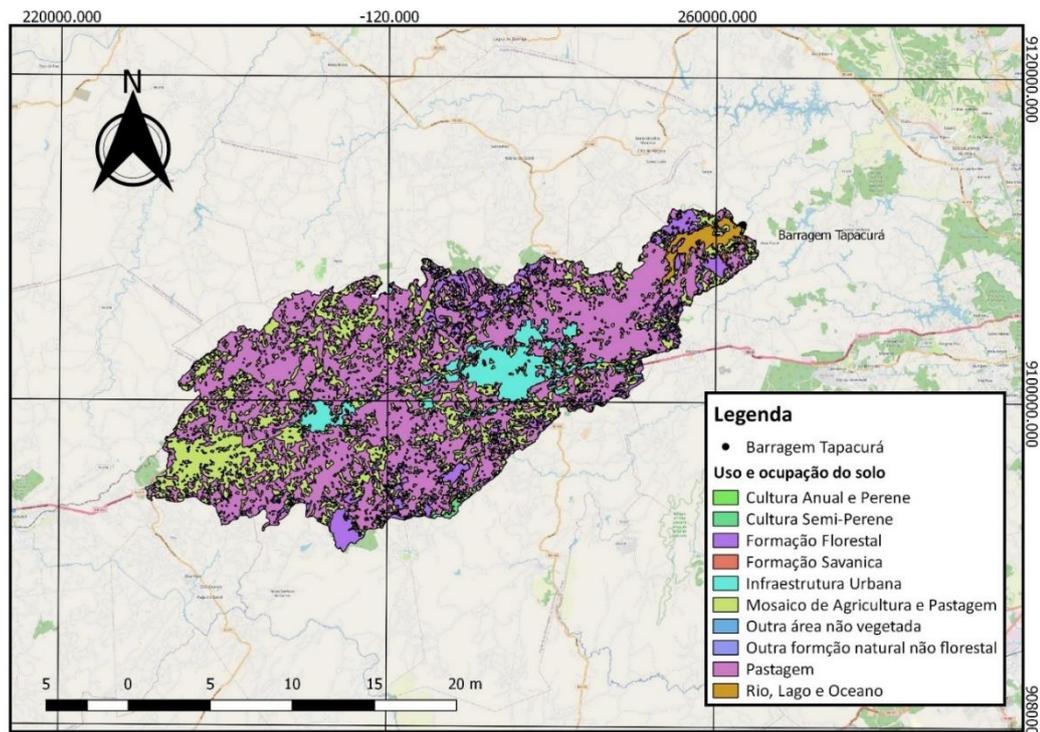


Figura 28 – Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da Barragem Tapacurá



Fonte: ArcGIS Pro 2.8 Esri, 2022

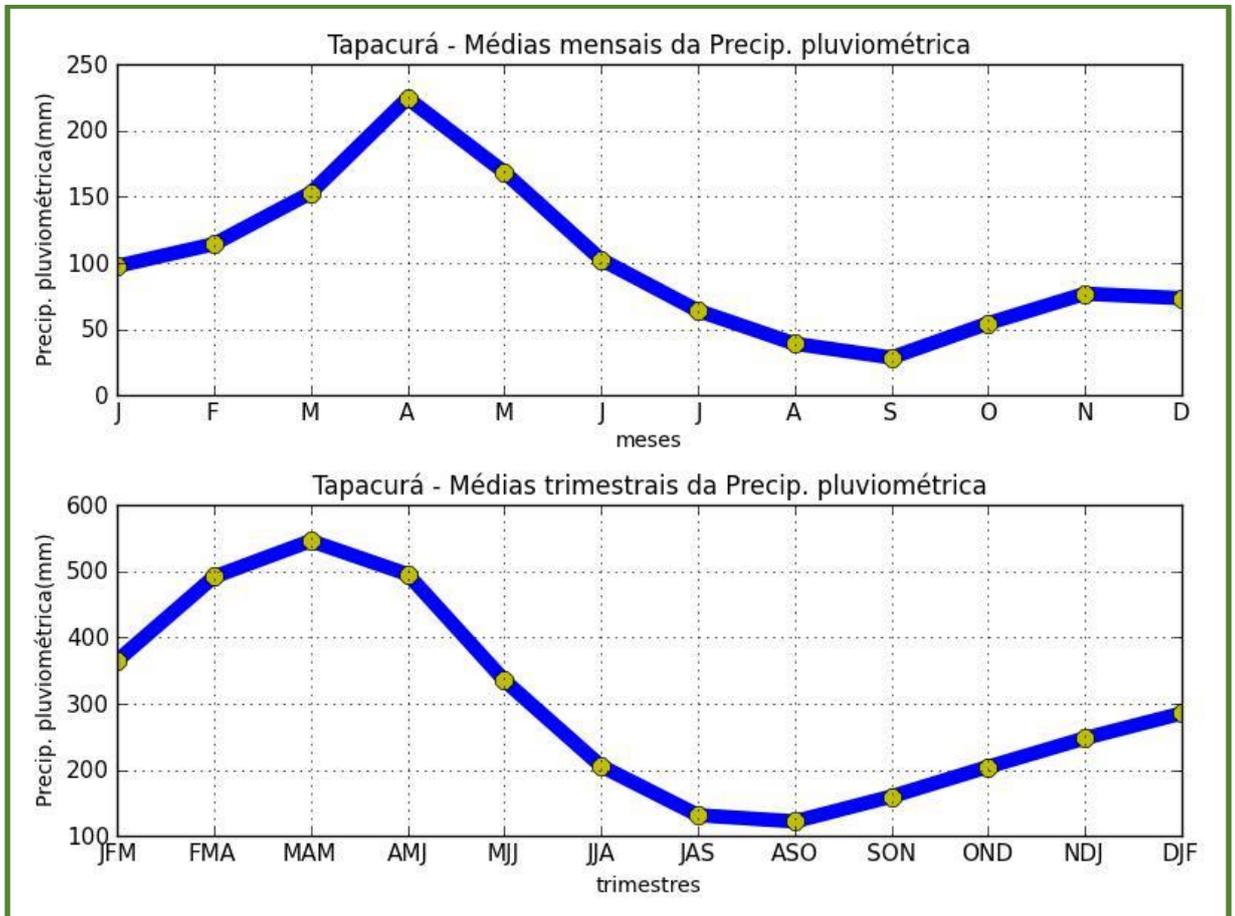
5.1.3 Dados Hidrometeorológicos

5.1.3.1 Climatologia

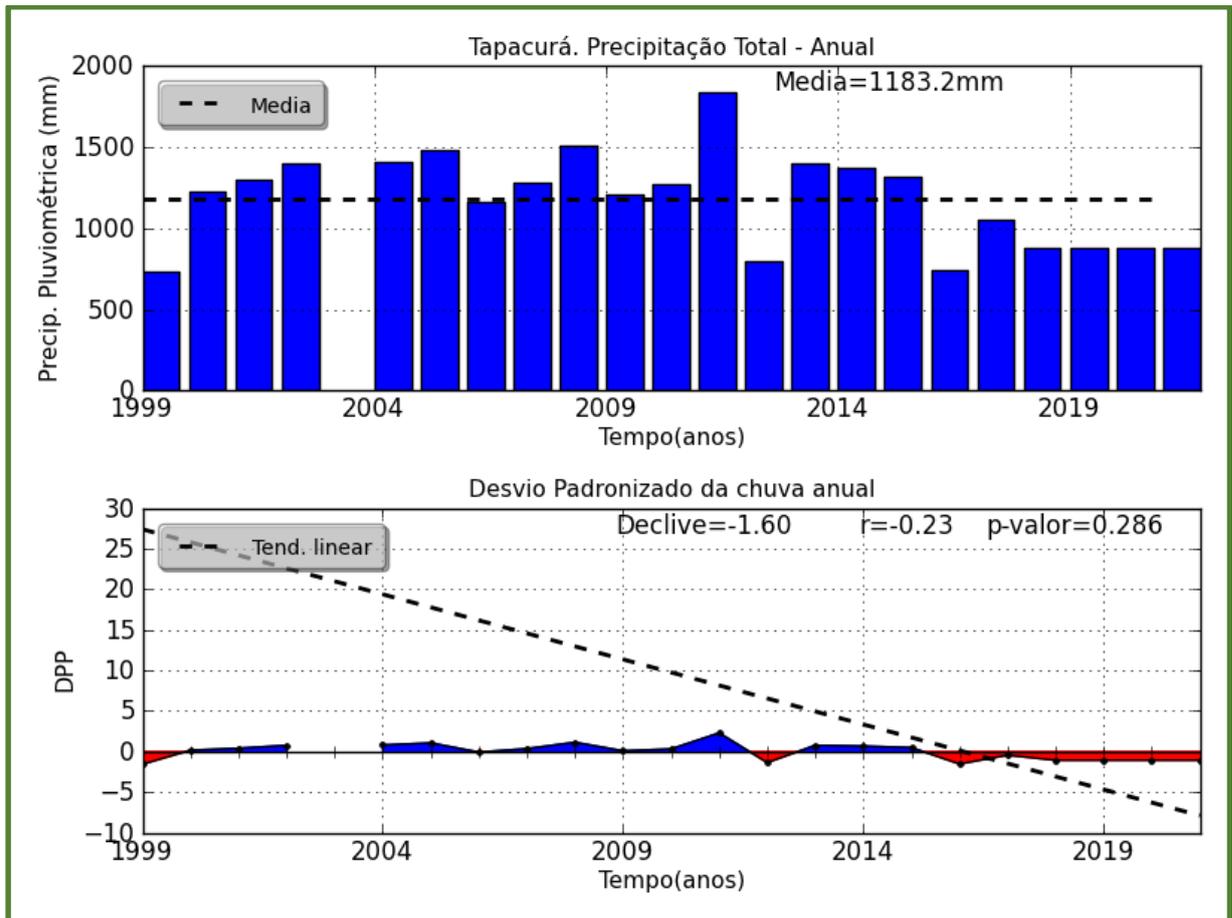
No presente estudo, o programa CLIMAP foi utilizado para determinar o ano hidrológico, que foi estabelecido como começando no mês de fevereiro, e estimar a precipitação média no posto pluviométrico de medição Tapacurá, em relação à barragem Tapacurá. A análise foi baseada em séries históricas de dados de precipitação coletados no referido posto pluviométrico. Utilizando o CLIMAP, foi possível investigar a distribuição temporal das precipitações, identificar padrões sazonais e variações anuais significativas. Com base nessas análises, o início e o fim do ano hidrológico foram estabelecidos, fornecendo uma compreensão mais precisa dos períodos de maior e menor ocorrência de chuvas.

Adicionalmente, o programa CLIMAP permitiu o cálculo da precipitação média anual conforme as figuras 29 e 30, resultando em um valor de 1183.2 mm. Essa estimativa média é um parâmetro crucial para compreender o comportamento hidrológico da região e avaliar a disponibilidade de água na barragem Tapacurá. Os resultados obtidos contribuíram significativamente para uma compreensão mais abrangente dos padrões climáticos locais e forneceram informações valiosas para a gestão eficiente dos recursos hídricos na área de estudo, para uma maior compreensão das eutrofizações que ocorrem no manancial que abastece a ETA Tapacurá.

Figura 29 - Médias mensais da precipitação pluviométrica



Fonte: Climap – Versão 3.0, 2016

Figura 30 - Precipitação Total

Fonte: Climap – Versão 3.0, 2016

5.1.3.2 Temperatura

As temperaturas normais mensais médias, mínimas e máximas foram obtidas a partir dos dados climáticos globais disponibilizados através do programa Climate Data, onde são apresentados dados climáticos globais para as cidades. Para representação da bacia foram obtidas temperaturas no município de São Lourenço da Mata, conforme a tabela 3.

Tabela 3 - Temperaturas normais para o município de São Lourenço da Mata- PE, em °C.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Tméd	26.3	26.5	26.6	26.1	25.3	24.4	23.7	23.7	24.3	25.3	26.1	26.4
Tmín	23.8	24	24	23.8	23.2	22.4	21.8	21.5	22	22.8	23.4	23.8
Tmáx	29.7	29.9	29.9	29.2	28.1	27	26.3	26.5	27.4	28.7	29.7	29.8

5.2 VOLUME DE ÁGUA UTILIZADO E DO LODO GERADO NAS OPERAÇÕES DE LAVAGEM DOS FILTROS E DESCARGAS DOS DECANTADORES DA ETA TAPACURÁ

5.2.1 volume de água utilizado na lavagem diária dos filtros e descarga dos decantadores.

A ETA Tapacurá possui 16 filtros com área total de 1.172,2 m² e com operação hidráulica de taxa declinante nível constante e 8 decantadores com área total de 2.088,95 m², sendo 4 convencionais e 4 lamelares. O volume médio diário e o volume médio mensal de água utilizado na lavagem dos filtros é de 2.250 m³ e 60.500 m³, respectivamente, podendo apresentar variações sazonais nestes valores. A operação de lavagem dos filtros é realizada com ar e água, havendo expansão, durante a lavagem, de 28% do leito filtrante, velocidade ascensional de lavagem de 0,97 m/min, tempo médio da lavagem total (ar+ar e água+ água) de 24 min., volume da descarga dos decantadores de 10.444,75 m³/decantador, durante as operações de limpeza geral e 16.711,6 m³ como resultado do somatório das descargas de manutenção do manto de lodo, que corresponde ao total mensal dos 8 decantadores. Esses dados variam ao longo do ano, dependendo do volume de chuvas.

Para a ETA Tapacurá, a vazão afluyente de água bruta média é de 3,2 m³/s, correspondendo a um volume diário aduzido de 276.480 m³/dia. Por conseguinte, a relação entre o volume consumido com água de lavagem dos filtros, descarga de decantadores e o volume aduzido para estação de tratamento é igual a 6,85%, o que é bastante elevado, visto que o percentual recomendado é de até 4% do volume produzido diário. Deste modo, justifica-se o reaproveitamento da água da lavagem de filtros (ALAF) e descarga dos decantadores (DD) e seu retorno para o início do processo de tratamento (FEREIRA FILHO 2020).

5.2.2 Quantificação do lodo gerado nas lavagens de filtros e descarga dos decantadores da ETA Tapacurá.

Existem diversas equações empíricas que estimam a produção de sólidos relacionando parâmetros como vazão afluyente, dosagem de coagulante e outros produtos aplicados no tratamento, além da concentração de sólidos em suspensão na água bruta. O cálculo de balanço de massa oferece precisão e representatividade na estimativa superiores às das fórmulas empíricas. Apesar disso, as equações são muito empregadas nos estudos devido à praticidade e principalmente por conta da falta de dados oferecidos pelas companhias operantes das estações. Outro fator importante é a influência da sazonalidade na produção de lodo. As equações, muitas vezes, não levam esse fator em consideração, aumentando as chances de erro na quantificação do resíduo. No caso dos mananciais que abastecem a ETA Presidente Castello Branco, a variação sazonal tem maior impacto na qualidade das águas que são superficiais, que é a principal fonte de água bruta para ETA's (AHMAD et al., 2017). Esta variação sazonal na produção do lodo, além de depender da qualidade da água dos mananciais superficiais, sofre

alteração em função da presença da chuva. A variação da qualidade de águas superficiais é consequência da complexa interação entre a sazonalidade chuvosa e ações antrópicas, o que resulta no comprometimento da qualidade das águas supracitadas. Isso porque, a precipitação (chuva) favorece o aporte de metais e bactérias aos mananciais superficiais.

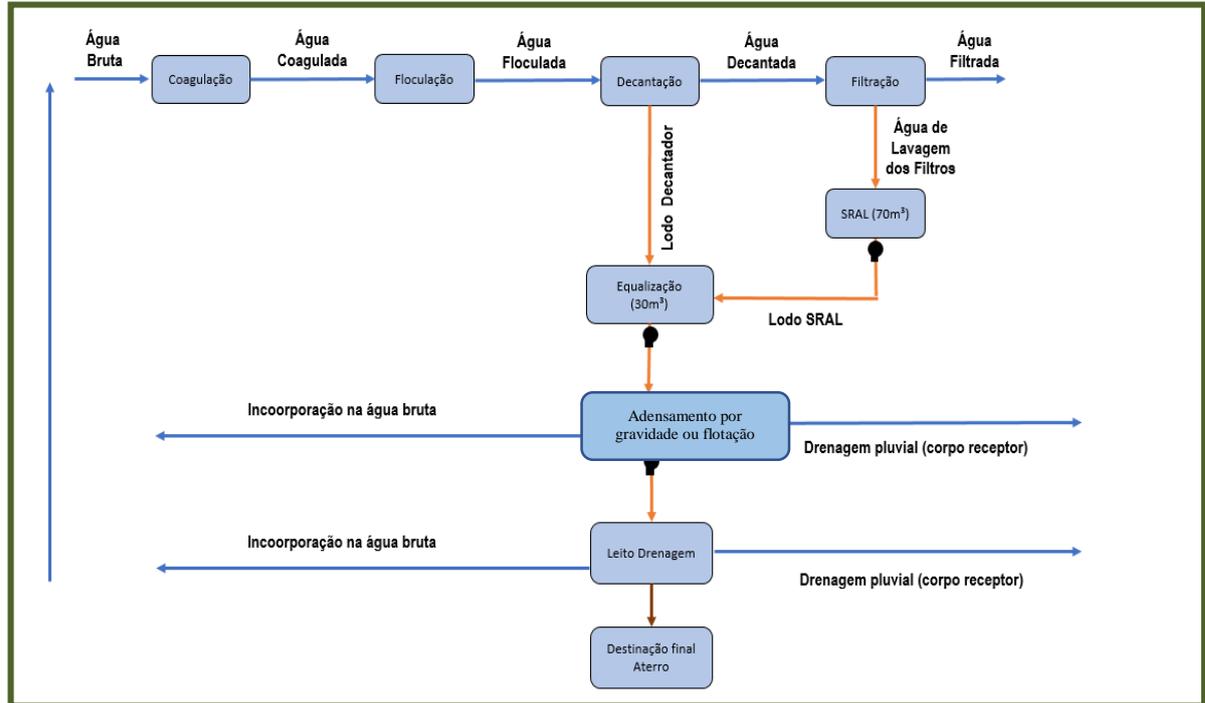
Por estes motivos a produção de lodo foi quantificada através de balanço de massa com dados dos períodos chuvosos das unidades que compõem o sistema de tratamento da ETA Tapacurá como apresentadas nas figuras 32 (A) e 32 (B). A quantificação desse lodo através do balanço de massa apresenta resultados mais precisos, principalmente para estações de tratamento que já operam (MEGID; AMER; ELSAYED, 2014).

A vazão de operação da ETA Tapacurá é de $3,2 \text{ m}^3/\text{s}$ com dosagem média de 95 mg/L de sulfato de alumínio em solução no período de estiagem ($8,64 \text{ mg/L}$, expresso como $\text{mg Al}^{+3}/\text{L}$) e 118 mg/L no período chuvoso ($10,72 \text{ mg/L}$, expresso como $\text{mg Al}^{+3}/\text{L}$).

Na quantidade de lodo gerado pela ETA, é admitida a incorporação de duas moléculas de água de hidratação por molécula de hidróxido metálico precipitado. Assim tem-se as seguintes concentrações diárias de lodo na ETA Tapacurá:

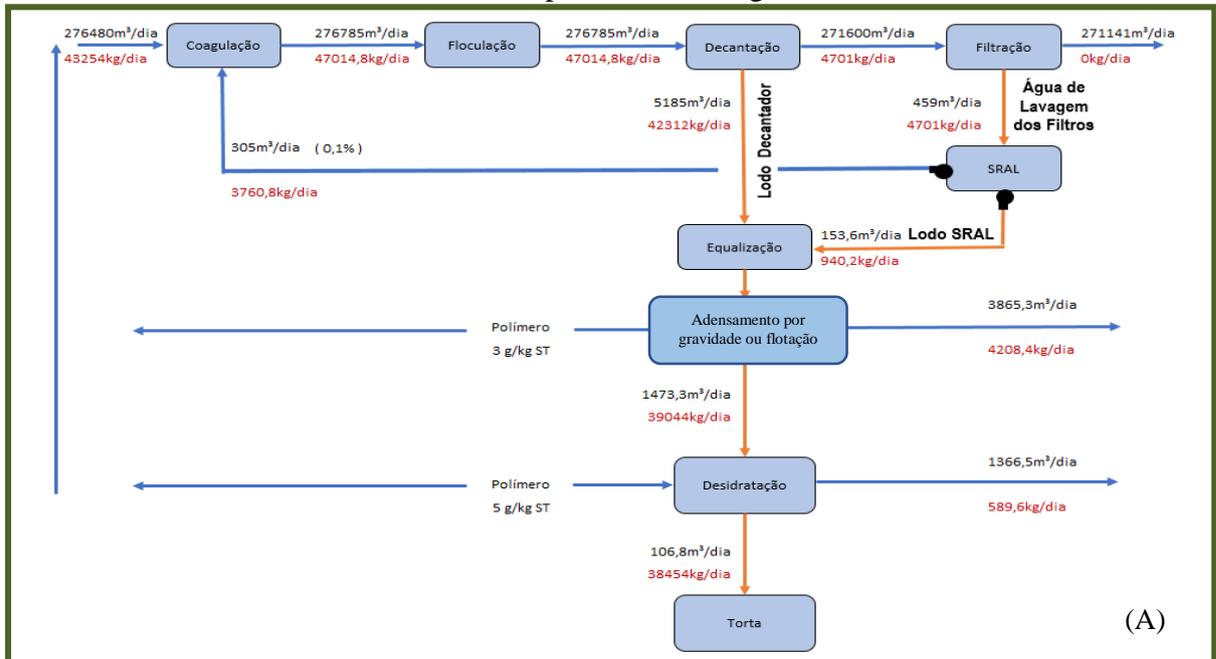
- Quantidade de lodo produzido no período chuvoso, considerando 120 mg/L de SST presentes na água bruta = $47.014,00 \text{ kg/dia}$.
- Desse total, $43.254,00 \text{ kg/dia}$ é a parcela do lodo resultante dos SST presentes na água bruta e $3.760,80 \text{ kg/dia}$ são oriundos do coagulante precipitado como hidróxido metálico.
- Quantidade de lodo produzido no período de estiagem, considerando SST presentes na água bruta = $39.520,12 \text{ kg/dia}$.
- Desse total, $36.360,00 \text{ kg/dia}$ é a parcela do lodo resultante dos SST presentes na água bruta, e $3.160,12 \text{ kg/dia}$ são oriundos do coagulante precipitado como hidróxido metálico.

Figura 31 – Fluxograma básico para tratamento de lodo gerado em Estações de Tratamento de Água

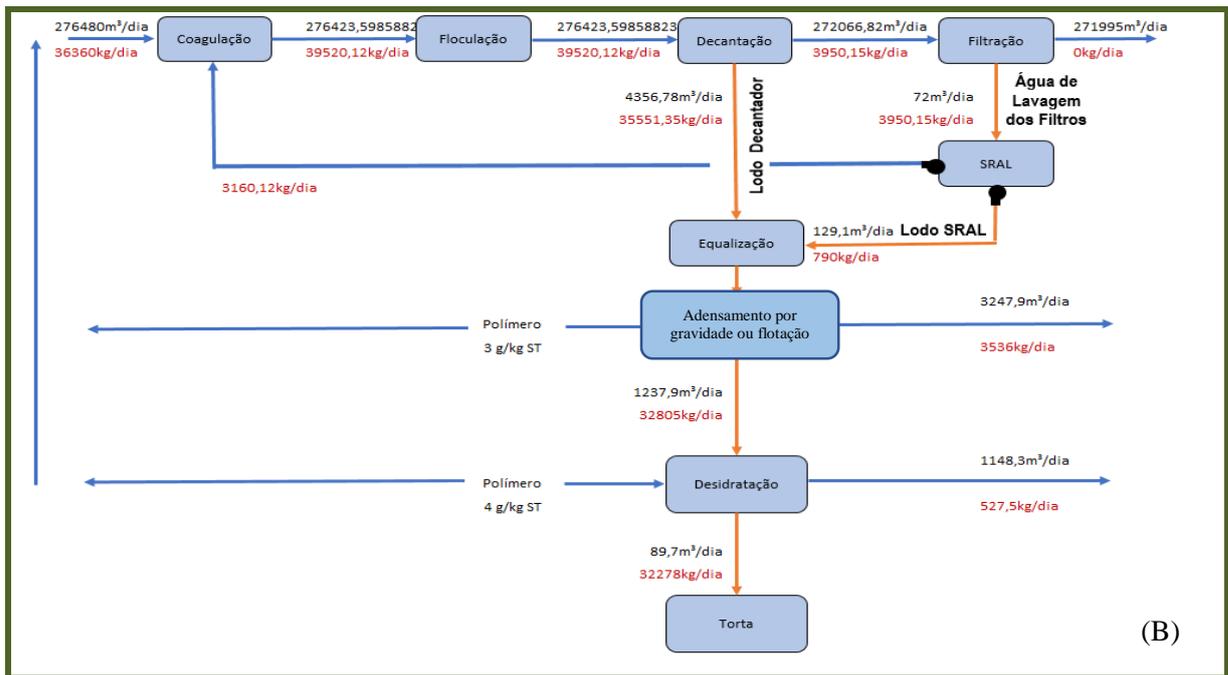


Fonte: Adaptado de Ferreira Filho (2020)

Figura 32 – Balanço de massa final para estimativa da produção de lodo nas diversas etapas da produção em uma Estação de Tratamento de Água. A) durante o período chuvoso; B) durante o período de estiagem



Fonte: Adaptado de Ferreira Filho (2020)



Fonte: Adaptado de Ferreira Filho (2020)

5.2.3 Caracterização do LETA gerado na ETA Tapacurá.

Durante o ano de 2011, o laboratório de análises de resíduos gerados em ETA e ETE da COMPESA/GERÊNCIA DE QUALIDADE, realizou monitoramento da água de lavagem dos filtros e da água da descarga dos decantadores da ETA Tapacurá, conforme dados apresentados na tabela 4. As amostras compostas, para análise, foram coletadas no tanque de equalização que recebe esses resíduos para em seguida lançá-los no corpo receptor. As coletas foram realizadas a cada 1 min, com tempo total de 15 min, totalizando 15 amostras. Os parâmetros pH, temperatura, zinco, fósforo e chumbo atenderam por completo à resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA 430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos de água), mas os parâmetros: cor, turbidez, sólidos sedimentáveis, sólidos totais, alumínio, ferro, manganês, Demanda Química de Oxigênio (DQO) e *Escherichia coli* não atenderam ao preconizado na citada legislação.

A faixa de pH do LETA encontrado tanto no período seco (setembro a março), como no chuvoso (abril a agosto), foi de 6,2 a 7,3 conforme apresentado no tabela 4. O pH é um parâmetro que deve ser avaliado em todas as técnicas, uma vez que é um indicador para seleção do produto a ser aplicado para o tratamento (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Segundo Richter (2009). Para essa faixa de pH é indicado a utilização do polímero catiônico para tratamento do lodo gerado.

A concentração dos sólidos sedimentáveis também varia de acordo com as características sazonais do manancial captado. Na barragem de Tapacurá, estas variações são de difícil quantificação quanto à origem, considerando ainda as características dos solos tais como textura, estrutura, plasticidade, grau de erosão entre outros.

Outro parâmetro importante na caracterização do lodo é a determinação dos metais. Estes compostos predominam de forma sensível na fase sólida do lodo e quanto maior o intervalo de tempo entre a limpeza dos decantadores e da lavagem dos filtros, maior é a sua concentração (CHEN; LEE; LEE, 2005). Conforme observado no tabela 4, o coeficiente de variação (CV%) das concentrações de ferro, alumínio e manganês apresentou valores elevados, indicando instabilidade e que ações mitigadoras são necessárias.

O lançamento *in natura* de LETA causa grande impacto ambiental devido à grande concentração de metais, em especial ferro e alumínio, que ao serem lançados em rios de baixa velocidade podem afetar a camada bentônica destes ecossistemas, formando bancos de lodo, assoreamento do curso d'água, alterações na cor e alterações na composição química e biológicas (ACHON *et al.*, 2005).

Conforme apresentado no tabela 4, o LETA da ETA Tapacurá, é composto maioritariamente de alumínio, compatível com ETAs que utilizam $(Al_2(SO_4)_3)$ como agente coagulante, seguido de ferro e manganês. Os metais pesados Zn e Pb são tóxicos para a vida aquática e para o ser humanos e foram encontrados no lodo em menores quantidades, assim como o fósforo. O desvio padrão relativo da média de concentração destes elementos variou de 0,6% a 425%, indicando uma variabilidade da composição química do lodo, principalmente para os elementos em menor quantidade. O parâmetro alumínio não está nas metas obrigatórias da Resolução nº 430/2011, mas no Art. 5 §2º, é enfatizado que os parâmetros que não estejam incluídos nestas metas, devem obedecer os padrões de qualidade do corpo receptor o qual esteja enquadrado quanto a sua classe (BRASIL, 2021).

Como o lançamento do LETA ocorre no rio que abastece a barragem de Tapacurá, uma alternativa é a recirculação da água para o início da ETA, visto que o mesmo classifica-se como sendo de Classe II, tendo como valor máximo permitido para a concentração de alumínio o valor de 0,1mg/l em corpos desta classe (BRASIL,2005), por este motivo o valor foi tomado como referência.

Conforme visto anteriormente, o parâmetro *E. coli* do LETA da ETA Tapacurá está fora dos padrões recomendados para água da classe 2. Elevadas concentrações destes microrganismos representa um potencial risco tanto no lançamento para o corpo receptor como para a sua integração na calha Parshall, no início do tratamento. A quantificação de

microrganismos de interesse sanitário reflete grande importância a saúde pública, uma vez que sua presença indica a contaminação por material de origem fecal (KONDAGESKI *et al.*, 2013).

Ainda observando o tabela 4, a DBO é inferior à DQO e a relação entre estes parâmetros permite estimar a biodegradabilidade do LETA e seu impacto ambiental em um corpo receptor. A biodegradabilidade de um determinado efluente líquido tem sido, muitas vezes, expressa pela relação entre os valores obtidos através de análises tanto para DQO como para DBO (ANDREOLI, 2013). Em LETA de ETA que utilizam o sulfato de alumínio como coagulante a DBO tem variado de 30 a 300 mg/L e a DQO de 30 a 5000 mg/L. O LETA da ETA Tapacurá tem relação DQO/DBO $> 4,0$ sendo considerado de elevada biodegradabilidade e a fração não biodegradável é muito elevada (VON SPERLING, 2014).

Tabela 4 - Caracterização físico-química e bacteriológica da água da lavagem dos filtros e descarga dos decantadores da Estação de Tratamento de Água Tapacurá em 2021

PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E BACTERIOLÓGICOS DA ÁGUA DAS DESCARGAS DOS DECANTADORES 2021															
Referência CONAMA N° 430	Cor (Pt/l)	Turbidez (Unt)	Ph	S. Sed (ml/l)	SST (mg/l)	DBO (mg O ₂ /l)	DQO (mg O ₂ /l)	Temp. (°C)	E.coli (NMP 100 ml)	Alumínio (mg/l)	Ferro (mg/l)	Zinco (mg/l)	Fósforo (mg/l)	Manganês (mg/l)	Chumbo (Pb)
	75**	100**	5-9	ATÉ 1	NE	NE	NE	40,000	1.000,000	0,1*	15,000	5,000	NE***	1,000	0,500
Janeiro	620	230	6,500	800,000	550,000	20,000	430,000	27,000	650,000	425,000	170,000	0,350	8,900	4,350	0,140
Fevereiro	710	280	6,900	650,000	480,000	35,000	520,000	28,000	720,000	365,000	195,000	0,280	7,300	4,390	0,023
Março	640	295	7,200	550,000	440,000	21,000	480,000	27,000	838,000	324,000	170,000	0,210	6,200	4,980	0,028
Abril	810	310	7,300	520,000	820,000	12,000	420,000	26,000	1.050,000	382,000	124,000	0,380	9,200	4,120	0,390
Mai	950	360	7,300	620,000	650,000	25,000	625,000	27,000	1.022,000	354,000	220,000	0,250	6,500	5,980	0,042
Junho	1200	420	6,400	740,000	750,000	32,000	27,000	26,000	920,000	398,000	125,000	0,180	9,500	4,250	0,032
Julho	1150	460	6,300	720,000	810,000	41,000	525,000	28,000	912,000	387,000	114,000	0,290	7,200	4,320	0,160
Agosto	1050	510	6,200	1.020,000	860,000	29,000	650,000	27,000	840,000	320,000	222,000	0,420	8,200	5,120	0,019
Setembro	750	210	6,900	800,000	520,000	42,000	720,000	26,000	950,000	425,000	154,000	0,140	9,800	5,320	0,012
Outubro	560	220	6,700	620,000	420,000	23,000	521,000	27,000	750,000	421,000	168,000	0,170	8,100	4,390	0,054
Novembro	510	195	6,800	690,000	490,000	25,000	502,000	26,000	840,000	378,000	175,000	0,240	7,900	4,180	0,065
Dezembro	523	218	6,700	700,000	485,000	36,000	458,000	24,000	720,000	425,000	120,000	0,290	6,500	4,270	0,027
Média	789,417	309,000	6,767	702,500	606,250	28,417	489,833	26,583	851,000	383,667	163,083	0,267	7,942	4,639	0,083
Desvio padrão	243,700	106,345	0,375	133,016	162,720	9,070	171,609	1,084	125,213	37,674	37,316	0,086	1,230	0,579	0,108
Coefficiente de variação	30,87%	34,42%	5,54%	18,93%	26,84%	31,92%	35,03%	4,08%	14,71%	9,82%	22,88%	32,31%	15,48%	12,48%	130,37%

*Valor referente ao padrão de alumínio em corpo hídrico classe I – águas doces;

** Valor referente ao padrão de cor e turbidez em corpo hídrico classe II – águas doces;

*** Art. 17. O órgão ambiental competente poderá definir padrões específicos para o parâmetro fósforo no caso de lançamento de efluentes em corpos receptores com registro histórico de floração de cianobactérias, em trechos onde ocorra a captação para abastecimento público.

5.2.4 **Determinação de Resistência Específica (RE) do LETA e ensaios de tratabilidade para definição da aplicação do polímero, definição dos gradientes de floculação e taxa de aplicação superficial (TAS).**

5.2.5 **Determinação de Resistência Específica (RE) do LETA.**

Os resultados obtidos nos ensaios de RE, conforme tabela 5, apontaram o polímero catiônico como tendo melhor performance. Lodos adensados sem condicionamento químico, provenientes de ETA que utilizam sulfato de alumínio como coagulante primário, apresentam valores de RE superiores a 5×10^{12} m/kg, sendo considerados, portanto, de difícil desaguamento (VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006). A RE do LETA de ETA convencionais varia de 6 a 12×10^{12} m/kg sem uso de polímeros, e da ordem de $1,5 \times 10^{12}$ m/kg quando se emprega polímero (HAN *et al.*, 2017). Resíduos com RE menor que $1,0 \times 10^{12}$ m/kg são de fácil desidratação, enquanto aqueles com RE superior a 5×10^{12} m/kg são de difícil desidratação. Por este motivo, a recomendação da RE de $1,0 \times 10^{12}$ m/kg como parâmetro para determinação da RE ideal para o processo (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012; (MOGHADDAM; MOGHADDAM; ARAMI, 2010).

O SST do LETA analisado na ETA Tapacurá foi de 570 mg/L e a RE do LETA sem aplicação de produto químico foi de $8,9 \times 10^{12}$ m/kg, indicando que se trata de um lodo de difícil desidratação. Neste trabalho, foi aplicado o polímero Polydadmac, polímero catiônico de alta carga e baixo peso molecular, recomendado para ser aplicado em operações com flotação com ar dissolvido (RITCHER, 2001), além de ter a característica de ser um modificador de superfície. A escolha deste polímero foi feita porque para a remoção de água do lodo há necessidade de alta carga para gerar aderência e baixo peso molecular, pois polímeros de médio e alto peso molecular são mais viscosos e interferem no processo (MOGHADDAM; MOGHADDAM; ARAMI, 2010).

A partir da figura 34, pode-se observar que este polímero apresentou melhor performance a partir da dosagem de 2 mg pol./g SST. Nos testes realizados com o polímero aniônico, os resultados não atenderam ao recomendado, que são valores inferiores a 1×10^{12} m.kg-1 que são fáceis de desaguar (CHEN; WANG; YANG, 2016). O polímero não iônico, que é um polímero sem carga, apenas a dosagem de 3,0 mg pol. /g SST, apresentou resultados de acordo com o recomendado; esse polímero tem a função de fazer pontes e aumentar a densidade aparente dos flocos, causando a sedimentação, não sendo aplicável na flotação por

ar dissolvido.

Tabela 5 - Resistência específica do Lodo da Estação de Tratamento de Água de Tapacurá, considerando aplicação de diferentes polímeros

RESISTÊNCIA ESPECÍFICA DO LODO (x 10 ¹²)						
LODO	DOSAGENS DE POLÍMERO (mg pol. /g SST)					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
LODO COM APLICAÇÃO DE POLÍMERO ANIÔNICO	4,8	4,2	3,7	3,6	3,4	2,2
LODO COM APLICAÇÃO DE POLÍMERO NÃO IÔNICO	3,5	3,1	2,12	1,9	1,2	1,0
LODO COM APLICAÇÃO DE POLÍMERO CATIÔNICO (POLYDADMAC)	2,1	1,54	1,4	0,97	0,91	0,65

Fonte: Autor (2023)

Como as águas da Barragem Tapacurá encontram-se eutrofizadas em algumas épocas do ano (período de estiagem), é possível que ocorra a decomposição anaeróbica do material sólido (fitoplâncton) com formação de compostos orgânicos que se ligam às moléculas de água (água intersticial), aumentando a complexidade para desidratação do lodo devido ao aumento de sua RE. Isso pode ser observado com o lodo de decantadores convencionais, como é o caso da ETA Tapacurá, que são limpos a cada 3 ou 4 meses (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). A adição de polímeros, em dosagens específicas pode melhorar substancialmente o adensamento/desaguamento, já que garante a formação de uma estrutura pouco compressível e de alta filtrabilidade (DONG; WANG; FENG, 2011), no caso das águas eutrofizadas em que o tipo de água presente no lodo é mais complexa, a aplicação de polímero catiônico de alta carga. É comum que lodos de águas eutrofizadas contenham uma quantidade significativa de água capilar (intersticial) devido à presença de materiais orgânicos e nutrientes que contribuem para a retenção de água nos poros do lodo.

5.2.6 Ensaios de tratabilidade para definição da aplicação do polímero, definição dos gradientes de floculação e taxa de aplicação superficial (TAS).

Foram realizados testes com aplicação de polímero Polydadmac nos ensaios de tratabilidade do LETA gerado na ETA Tapacurá, tabela 6. Por ser um polímero de alta carga e baixo peso molecular), taxas de recirculação relativamente baixas (em torno de 30 - 40%) podem ser atingidas, embora as taxas de recirculação sejam bem superiores para o tratamento de LETA, conforme literatura específica (SHI *et al.*, 2017). O uso do Polydadmac como um produto químico no FAD, obtém a remoção de células com ótimo resultado devido à modificação da superfície da bolha, na qual são criados sítios positivos na superfície, aumentando a eficiência de adesão, em virtude de pontes formadas entre a bolha e a superfície

da célula (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURION FILHO, 2002). Semelhante a partículas influentes (geralmente com um diâmetro menor que 1 micrômetro, que podem influenciar a dinâmica e as propriedades do fluido em que estão suspensas.) e colóides, as microbolhas do FAD são carregadas negativamente, provavelmente devido a dipolos assimétricos de moléculas de água nas interfaces de gás-líquido da bolha. A manipulação da carga da superfície da bolha, em oposição à das partículas, tem recebido atenção como alternativa ao adensamento de LETA produzido em ETA que tratam água bruta eutrofizada (HAN; KIM; KIM, 2015), que é uma característica da água bruta aduzida pela ETA Tapacurá.

A concentração de SST do LETA da ETA Tapacurá foi de 720 mg/L, bem como valores de cor e turbidez de 930 uC e 211 uT, respectivamente. Analisando a figura 19, pode-se observar que foram utilizadas três pressões (5 – 5,5 – 6 atm) nos ensaios de tratabilidade, um gradiente (100 s^{-1}), duas taxas de recirculação e dosagem de polímeros variando de 0,5 a 3 mg pol/g SST, com Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) foi de 15 min. As microbolhas geradas durante a recirculação proporcionam condições adequadas para colisão entre as partículas e bolhas de gás, reduzindo, assim, o tempo de floculação (HENDERSON; SIMON; BRUCE, 2008).

Para a eficiência significativa de um sistema de FAD, o tempo recomendado na etapa de floculação é de 5 a 20 min (sendo mais aplicado para o LETA o tempo de 15 min, tempo suficiente para formação de flocos resistentes as tensões de cisalhamento), dependendo da qualidade da água. A qualidade do floco tais como resistência a tensão de cisalhamento, tamanho do floco, é fundamental para performance na flotação; o gradiente de floculação entre 30 e 120 s^{-1} , dependendo do tipo de floculante/polímero a ser aplicado, polímeros catiônicos o gradiente mais usual é de 100 s^{-1} (SOHN *et al.*, 2009).

Um modo efetivo de melhorar a flotação das partículas é reduzir o tamanho das bolhas, o que corresponde a um aumento na área superficial de bolhas e, portanto, em um aumento na probabilidade de colisão entre as partículas, para uma determinada vazão de gás (PEASE; CURRY; YOUNG, 2006).

Para a ETEf piloto estudada neste trabalho, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Pressão: 5 - 5,5 - 6,0 atm
- Gradiente de floculação: 50 -100 s^{-1}
- Taxa de recirculação: 30-40%

Nas figuras 33,34 e 35 são apresentados gráficos de efeitos principais. O processo experimental dessa técnica consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental, para em seguida, determinar e interpretar os efeitos principais e de interação dos

fatores investigados e assim, poder identificar as melhores condições experimentais do produto ou processo de fabricação. Com esse tipo de planejamento, é possível determinar os efeitos principais e de interação que as variáveis independentes produzem nas respostas (MARTINS DOMINGUES, 2011). Na avaliação dos melhores resultados, pode-se observar que com relação às pressões de 6 atm e 5,5 atm, os resultados não apresentaram diferença significativa, indicando que o aumento de pressão não garante a qualidade do clarificado, pois esse aumento tende a formar bolhas irregulares reduzindo a performance do tratamento (ETCHEPARE *et al.*, 2017). Com a pressão de 5 atm, os resultados foram inferiores às outras duas pressões investigadas. Os melhores resultados foram obtidos com pressão de 5,5 atm, gradiente de 100 s⁻¹ e taxa de recirculação de 40%. Considerando estas variáveis, a melhor dosagem de polímero foi a 3 mg pol/g SST, com resultados de remoção de 98,49% de cor, 97,15% de turbidez e 98,33% de SST. O polímero testado, como modificador de superfície, permitiu uma excelente performance com dosagens relativamente baixas, além de permitir uma floculação satisfatória, evitando o efeito de viscosidade, que é uma das variáveis que comprometem o desempenho da flotação (HUANG *et al.*, 2017). Embora o tamanho de bolha seja de grande importância na flotação, deve ficar claro que este efeito também depende de outras variáveis, especialmente do grau de agitação ou turbulência, a densidade das partículas ou agregados e do diâmetro de partículas ou agregados. Por este motivo foi utilizado um gradiente de 100 s⁻¹ neste trabalho.

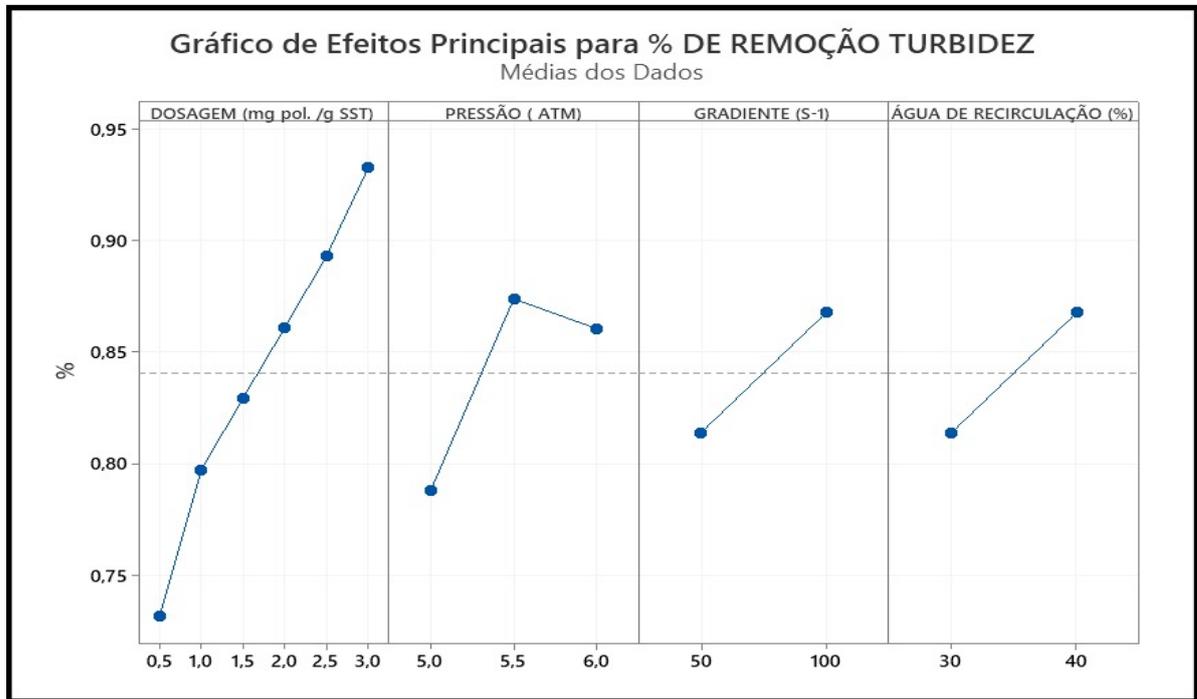
Analisando as figuras 36, 37 e 38 pode-se observar, que a interação entre a pressão de 5,5 atm, gradiente de 100 s⁻¹, taxa de recirculação de 40% e a dosagem de 3 mg pol/g SST, mostrou a melhor interação. Entretanto, mesmo com os resultados obtidos no ensaio de tratabilidade, foi aplicado na ETA piloto as cinco dosagens de polímero utilizadas nos ensaios de bancada, com vistas à verificação de resultados na planta piloto. Observa-se no tabela 7 que o melhor resultado no Flotatest foi aquele cuja velocidades ascensional foi de 19 cm/min que corresponde a taxa de aplicação superficial de 273,6 m³/m².dia. Experiências no tratamento de resíduos de ETA mostraram resultados satisfatórios com taxas de aplicação superficial na faixa de 100 a 300 m³/m².dia, que correspondem a velocidades ascensionais de flotação de 7,2 a 21,6 cm/min (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN 2017). O parâmetro de dimensionamento mais relevante da zona de separação de sólidos é a sua taxa de aplicação superficial, recomendando-se que se situe entre 120 e 360 m³/m².dia para unidades de FAD (FERREIRA FILHO, 2020).

Tabela 6 - Ensaio de tratabilidade do Lodo da Estação de Tratamento Tapacurá com utilização do polímero POLYDADMAC

DOSAGEM (mg pol./g SST)	PRESSÃO (ATM)	GRADIENTE (S ⁻¹)	ÁGUA DE RECIRCULAÇÃO (%)	COR (Uc)	COR REMANESCENTE(uC)	% DE REMOÇÃO COR	TURBIDEZ (unf)	TURBIDEZ REMANESCENTE (unf)	% DE REMOÇÃO TURBIDEZ	SST (mg/l)	SST REMANESCENTE (mg/l)	% DE REMOÇÃO SST
0,5	5	50	30	930	440	0,52688172	211	75	0,644549763	720	320	0,555555556
1	5	50	30	930	370	0,602150538	211	60	0,71563981	720	210	0,708333333
1,5	5	50	30	930	350	0,623655914	211	52	0,753554502	720	190	0,736111111
2	5	50	30	930	290	0,688172043	211	38	0,819905213	720	160	0,777777778
2,5	5	50	30	930	180	0,806451613	211	29	0,862559242	720	60	0,916666667
3	5	50	30	930	85	0,908602151	211	20	0,90521327	720	30	0,958333333
0,5	5	100	40	930	350	0,623655914	211	71	0,663507109	720	290	0,597222222
1	5	100	40	930	240	0,741935484	211	58	0,725118483	720	190	0,736111111
1,5	5	100	40	930	150	0,838709677	211	47	0,777251185	720	140	0,805555556
2	5	100	40	930	100	0,892473118	211	39	0,815165877	720	120	0,833333333
2,5	5	100	40	930	85	0,908602151	211	31	0,853080569	720	50	0,930555556
3	5	100	40	930	60	0,935483871	211	17	0,91943128	720	25	0,965277778
0,5	5,5	50	30	930	230	0,752688172	211	62	0,706161137	720	205	0,715277778
1	5,5	50	30	930	160	0,827956989	211	45	0,786729858	720	150	0,791666667
1,5	5,5	50	30	930	110	0,88172043	211	37	0,82464455	720	110	0,847222222
2	5,5	50	30	930	60	0,935483871	211	29	0,862559242	720	90	0,875
2,5	5,5	50	30	930	50	0,946236559	211	21	0,900473934	720	38	0,947222222
3	5,5	50	30	930	20	0,978494624	211	12	0,943127962	720	19	0,973611111
0,5	5,5	100	40	930	160	0,827956989	211	30	0,857819905	720	190	0,736111111
1	5,5	100	40	930	95	0,897849462	211	24	0,886255924	720	130	0,819444444
1,5	5,5	100	40	930	84	0,909677419	211	20	0,90521327	720	95	0,868055556
2	5,5	100	40	930	47	0,949462366	211	19	0,909952607	720	82	0,886111111
2,5	5,5	100	40	930	32	0,965591398	211	14	0,933649289	720	25	0,965277778
3	5,5	100	40	930	14	0,984946237	211	6	0,971563981	720	12	0,983333333
0,5	6	50	30	930	240	0,741935484	211	70	0,668246445	720	211	0,706944444
1	6	50	30	930	170	0,817204301	211	43	0,796208531	720	150	0,791666667
1,5	6	50	30	930	119	0,872043011	211	39	0,815165877	720	114	0,841666667
2	6	50	30	930	65	0,930107527	211	31	0,853080569	720	92	0,872222222
2,5	6	50	30	930	54	0,941935484	211	24	0,886255924	720	39	0,945833333
3	6	50	30	930	22	0,976344086	211	20	0,90521327	720	22	0,969444444
0,5	6	100	40	930	170	0,817204301	211	32	0,848341232	720	200	0,722222222
1	6	100	40	930	100	0,892473118	211	27	0,872037915	720	145	0,798611111
1,5	6	100	40	930	85	0,908602151	211	21	0,900473934	720	97	0,865277778
2	6	100	40	930	50	0,946236559	211	20	0,90521327	720	86	0,880555556
2,5	6	100	40	930	37	0,960215054	211	16	0,924170616	720	28	0,961111111
3	6	100	40	930	16	0,982795699	211	10	0,952606635	720	14	0,980555556

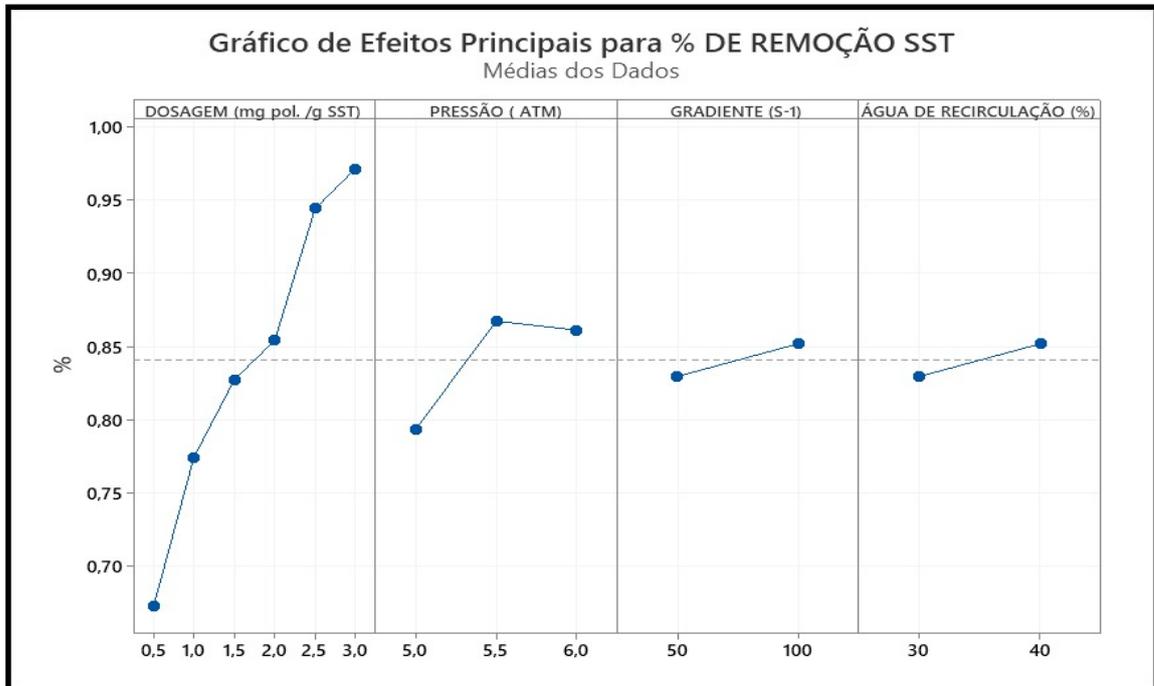
Fonte: Autor (2023)

Figura 33 – Gráficos de efeitos principais indicando percentual de remoção de turbidez



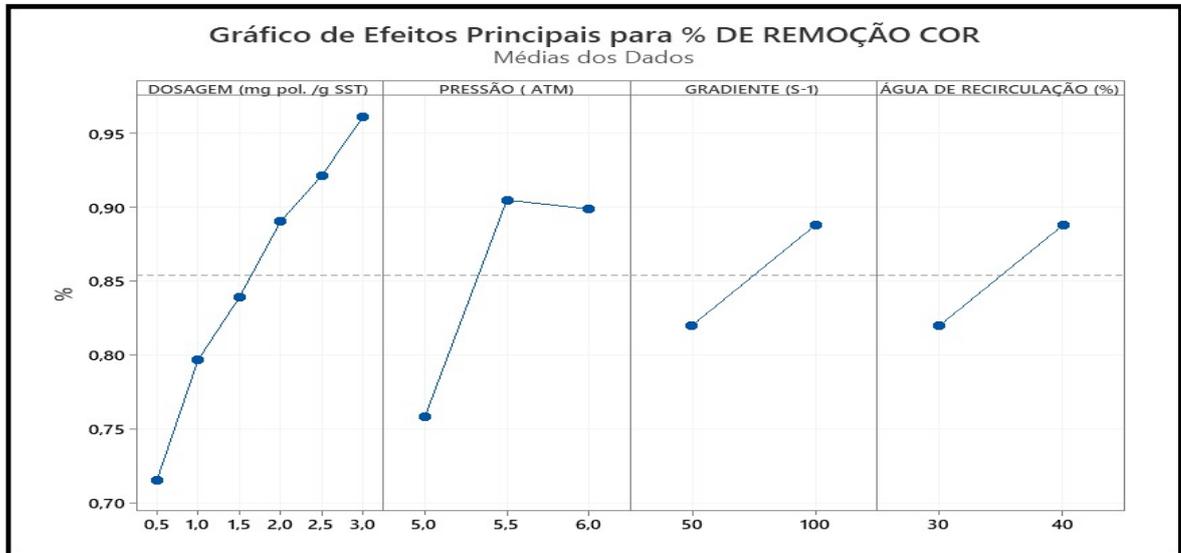
Fonte: Autor (2023)

Figura 34 – Gráficos de efeitos principais indicando percentual de remoção de sólidos solúveis totais



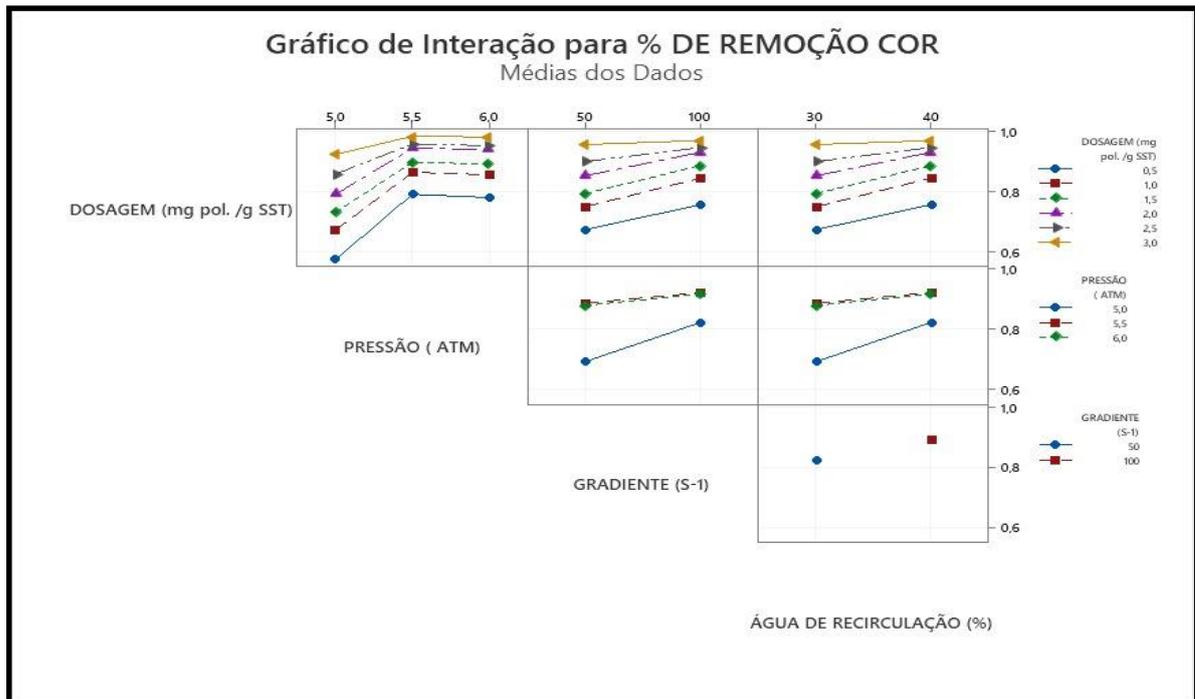
Fonte: Autor (2023)

Figura 35 – Gráficos de efeitos principais indicando percentual de remoção de cor



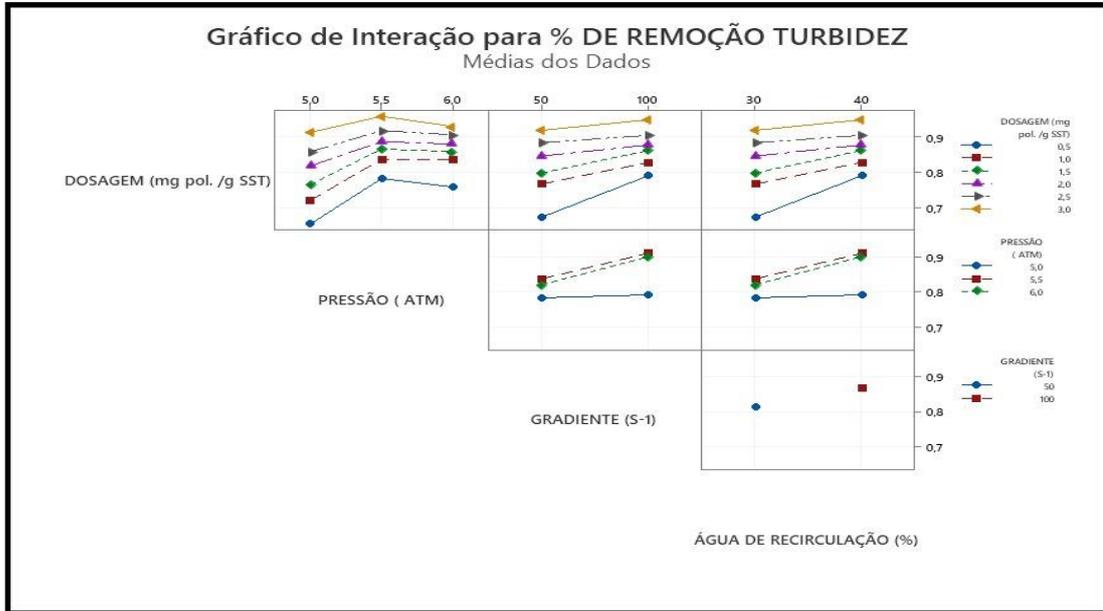
Fonte: Autor (2023)

Figura 36 – Gráficos de interação indicando percentual de remoção de cor



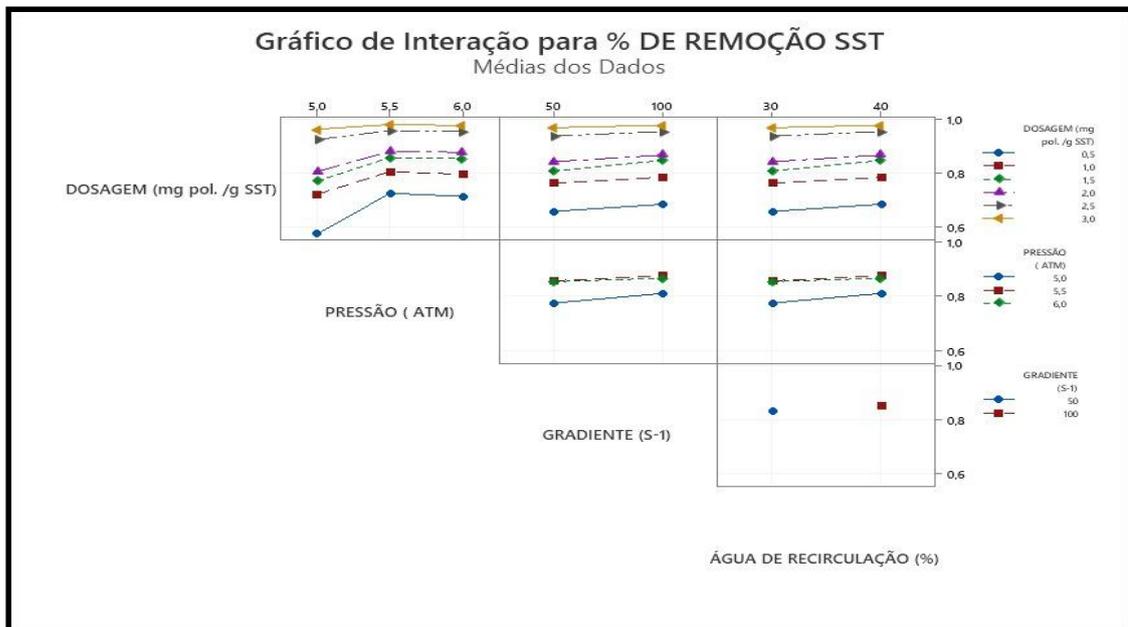
Fonte: Autor (2023)

Figura 37 – Gráficos de interação indicando percentual de remoção de turbidez



Fonte: Autor (2023)

Figura 38 – Gráficos de interação indicando percentual de remoção de sólidos suspensos totais



Fonte: Autor (2023)

Tabela 7 - Determinação da taxa de aplicação superficial, considerando diferentes valores de velocidade ascensional, cor, turbidez e sólidos suspensos totais

DETERMINAÇÃO DA TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL (TAS)											
DOSAGEM	PRESSÃO	GRADIENTE	ÁGUA DE RECIRCULAÇÃO	RELAÇÃO A/S	VELOCIDADE ASCENSIONAL (cm/min)	COR (uC)	% DE REMOÇÃO	TURBIDEZ (U _{nt})	% DE REMOÇÃO	SST (mg/l)	% DE REMOÇÃO
3 mg pol./g SST	5,5 ATM	100 s ⁻¹	40%		8	120	87,09677419	20	90,52132701	78	89,16666667
					10	50	94,62365591	12	94,31279621	51	92,91666667
					15	21	97,74193548	9	95,73459716	14	98,05555556
					19	12	98,70967742	5	97,63033175	6	99,16666667
					20	13	98,60215054	7	96,68246445	8	98,88888889
					21,6	14	98,49462366	8	96,20853081	9	98,75

Fonte: Autor (2023)

5.3 RESULTADOS ETAPA 5 - Verificação os parâmetros do projeto mais eficientes na redução das variáveis de qualidade de LETA.

A tabela 8, indica o volume do ar precipitado em função da pressão manométrica, que nos ensaios na ETEf piloto, foram aplicadas as pressões de 5,0-5,5 e 6,0 atm, correspondentes às pressões de 5,06 – 5,57 e 6,08 x10² kPa, na temperatura de 27 °C. Na tabela 9, observa-se que a relação A/S – AR/SÓLIDO apresenta valores de 0,0545, 0,0600 e 0,0655. Conforme estudo publicado por Hibeller (2017), os valores para essa relação se enquadram entre os valores de 0,005 e 0,067, referindo-se aos casos em que o efluente é uma água residuária, com elevado teor de sólidos suspensos, que é o caso do efluente estudado. Neste trabalho, os valores da relação A/S se encontram na faixa recomendada para as pressões de 5,06 e 5,57 10² kPa, oferecendo condições satisfatórias para remoção de sólidos.

Tabela 8 – Volume de ar precipitado em função da pressão manométrica

K _{ar} (mL/L.10 ² kPa)	Volume de ar precipitado por litro de água, mL/L	Pressão Manométrica, 10 ² kPa										
		1	2	3	4	5	5.06	5.57	6	6.08	7	8
28,44		28,44	56,88	85,32	113,76	142,2	143,9064	158,4108	170,64	286,6752	199,08	227,52
23,195		23,2	46,39	69,59	92,78	115,98	117,4166	129,255	139,17	141,0934	162,67	185,56
19,825		19,83	39,65	59,48	79,3	99,13	100,3169	110,4275	118,95	120,5381	138,78	158,6
19,411		19,41	38,82	58,24	77,65	97,06	98,23011	108,1313	116,47	118,0325	135,93	155,29
17,611		17,61	35,22	52,83	70,45	88,06	89,11385	98,09586	105,67	107,0779	123,28	140,89
16,066		16,07	32,13	48,2	64,27	80,33	81,2972	89,49108	96,4	97,68496	112,47	128,53
15,183		15,18	30,37	45,55	60,73	75,92	76,8278	84,57142	91,1	92,31504	106,28	121,47

Fonte: Adaptado de Ritcher (2001).

Tabela 9 - Relação Ar / sólidos (A/S)

RELAÇÃO (A/S)				
TAXA DE RECIRCULAÇÃO ADOTADA (%)	SST (mg/l)	PRESSÃO (10 ² kPa)	Vol. _{ar} /Vol.água (Henry) mL _{ar} /L	Relação (A/S)
40	720	5,06	98,23011	0,054572283
		5,57	108,1313	0,060072944
		6,08	118,0325	0,065573611

Fonte: Autor (2023)

A eficiência da separação por flotação depende do dimensionamento das etapas para execução do projeto, tais como distribuição do tamanho das bolhas, eficiência da transferência de massa de gás para líquido, hidrodinâmica, características físico-químicas do afluente, geometria interna dos reservatórios (LEWANDOWSKI, 2019), conforme itens apresentados na tabela 10, onde são apresentados os dados do projeto da unidade piloto utilizada na etapa de adensamento do LETA. Nesse projeto de associação de flocladores em bandejas com flotação por ar dissolvido com aplicação de um polímero modificador de superfície, o papel dos flocladores foi de suma importância para formação de um floco bem definido e de fácil ascensão pela flotação, facilitando a interação flocos bolha. A interação entre flocos e bolhas é crucial para alcançar a eficiência de separação na zona de separação do processo de flotação por ar dissolvido.

A dessorção é o principal fator que reduz a eficiência de separação (WANG; NGUYEN; MITRA, 2016). As bolhas nos flocos provavelmente serão dissolvidas quando os flocos colidirem com as bolhas livres (RITCHER, 2001). A probabilidade de dessorção aumenta à medida que os tamanhos dos flocos e bolhas aumentam. A ocorrência simultânea de colisão, adesão e dessorção na zona de separação necessita de mais pesquisas. Na zona de contato do FAD, o tamanho dos flocos é geralmente menor que o das bolhas (HAN *et al.*, 2017). Conseqüentemente, os flocos são capturados por bolhas, mas, como mencionado anteriormente, o tamanho dos flocos na zona de separação é maior que o das bolhas. Essa diferença indica que os flocos podem capturar bolhas, levando a variações no padrão de interação. Ocorre que um grande número de pequenas bolhas adira à superfície de grandes flocos. As bolhas adsorvidas podem coalescer umas com as outras, resultando na formação de grandes bolhas. Esta ocorrência pode afetar a flutuabilidade dos flocos e a eficiência de remoção do DAF, por este motivo foram estudadas três pressões para avaliar e evitar tal fenômeno.

Tabela 10 - Dados do projeto Floco-Flotador por Ar Dissolvido (FFAD)

SISTEMA DE SATURAÇÃO COM GEOMETRIA EM SERPENTINA				
VAZÃO DE ÁGUA CIRCULADA				0,78 m ³ /h
TEMPO DE DETENÇÃO DIFERENCIAL				1 min.
VOLUME DA SERPENTINA				0,0039 m ³
DIÂMETRO DA SERPENTINA ADOTADO				63 m
COMPRIMENTO DA SERPENTINA ADOTADO				1,50 m
DIÂMETRO TEÓRICO DOS NÚCLEOS DAS MICROBOLHAS GERADAS				
PRESSÃO (10 ² kPa)		TEMPERATURA (°C)		DIÂMETRO DA MICROBOLHA
	5,06	27		0,57 µm
	5,57			0,51 µm
	6,08			0,47 µm
QUANTIDADE DE MICROBOLHAS DE AR POR M ³ DE ÁGUA NA MISTURA				
PRESSÃO (10 ² kPa)	CONSTANTES DA LEI DE HENRY PARA O AR ((mg/l)/atm)	TEMPERATURA (°C)	SSA ESPECÍFICA DO AR SATURADO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	QUANTIDADE TEÓRICA DE MICROBOLHAS POR M ³
5,06	21,4	27	1179,7	1,88 x 10 ²²
5,57				2,00 x 10 ²³
6,08				2,29 x 10 ²³
FLOCULADOR DE BANDEJAS PERFORADO				
QUANTIDADE DE FLOCULADORES		3 UNIDADES		
DISTÂNCIA ENTRE OS ORIFÍCIOS		0,25 m		
NÚMERO DE ORIFÍCIOS NA VERTICAL		16		
DIÂMETRO DE ORIFÍCIOS NA BANDEJA		32 mm		
GRADIENTE DE VELOCIDADE		100 s ⁻¹		
TEMPO DE DETENÇÃO HIDRÁULICO (TDH)		15 min.		
ALCANCE DOS JANTOS PELOS ORIFÍCIOS		0,75 m		
SISTEMA DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO				
TEMPO DE DETENÇÃO HIDRÁULICO (TDH)		0,97 min.		
VELOCIDADE ASCENCIONAL / TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL (TAS)		1,9 cm/min - 273,6 m ³ /m ² .dia		

Fonte: Autor (2023)

Os ensaios foram realizados na ETA Castello Branco com os resíduos gerados na unidade. É complexo estabelecer critérios para analisar a performance de uma unidade de tratamento quando esta recebe uma água natural como afluente, pois esta água sofre variações sensíveis em pequenos intervalos de tempos e cujas características podem variar a cada ensaio (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Essa dificuldade tem um grau de complexidade ainda maior quando o objeto de estudo são os resíduos gerados nas ETA, após sua carreira de filtração, ou seja, após a saturação das unidades de filtração em que o manancial adotado é do tipo superficial.

Foram observadas alterações nas características físico-químicas dos resíduos durante os ensaios na unidade piloto de FFAD. Conforme observado na tabela 11, foram realizados 6 ensaios com dosagens de polímero variando de 0,5 a 3,0 mg pol./g SST e, em cada dosagem de polímero, foram avaliadas três pressões (5,0 – 5,5 – 6,0 atm). A taxa de recirculação, o gradiente foram e a taxa de aplicação superficial foram mantidos em 40%, 100 s^{-1} e $273,6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, respectivamente, em todos os ensaios, considerando os testes de bancada e as recomendações da literatura. Um ponto que foi considerado no projeto da ETEF foram as condições inerentes ao formato da câmara de flotação, circular ou retangular. No caso de câmaras de flotação retangulares, a zona de mistura localiza-se no interior da câmara, com a tubulação de distribuição de água pressurizada disposta transversalmente, no caso da circular aplicado nesse projeto o fundo é falso, com orifícios para atender toda seção transversal da câmara, evitando zona de curto-circuito (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Os valores dos parâmetros a serem analisados nos ensaios na unidade piloto estavam diferentes dos resultados indicados durante a caracterização desses resíduos na fase inicial dos trabalhos. Essas variações foram provenientes de alterações nas características da água do manancial e na dosagem de produtos químicos utilizados durante o tratamento de água na ETA Presidente Castello Branco. Estas alterações alteraram a taxa de cisalhamento dos flocos, a carreira de filtração das unidades de filtração e na velocidade de sedimentação com impacto na qualidade dos resíduos formados. Os melhores resultados de cada ensaio foram os que aplicaram a pressão de 5,5 atm, neles foram realizados testes para determinação de teor de sólidos no lodo flotado, conforme apresentado na tabela 12. Os resultados apresentados indicam que a FFAD atende aos valores de teor de sólidos (1% a 8%), para diferentes tecnologias de desaguamento, conforme estudado por Un *et al.* (2014). Alguns dos métodos de desague existentes no mercado exigem um teor mínimo de sólidos no lodo para um funcionamento mais eficiente.

Na centrifugação, é recomendável que o lodo a ser desidratado apresente um teor de

sólidos maior que 2%, tendo em vista que os equipamentos existentes no mercado exigem esse requisito para um funcionamento de forma adequada e econômica. O teor de sólidos em lodo adensado é uma consideração importante para o projeto de sistemas de gerenciamento de lodo, pois influencia o volume e o custo do transporte e do descarte do lodo. Além disso, o teor de sólidos também pode afetar a eficiência dos processos de tratamento subsequentes. Os tratamentos dos resíduos de ETA necessitam de uma etapa anterior à desidratação que seja eficiente. No caso da FAD, o mecanismo permite obter diretamente um teor de sólidos aceitável para desidratação (ZHAO *et al.*, 2002), visto que a saturação do ar na água é fator determinante para performance do tratamento.

No ensaio 1, com dosagem de 0,5 mg pol./g SST e taxa de recirculação de 40%, os melhores resultados foram verificados quando a pressão de serviço era de 5,5 atm.

Nesta situação, foram observadas reduções de 75,26% na turbidez, 87,69% da cor, 87,00% dos SST, 96,72% do alumínio, 95,91% do ferro, 74,47% do manganês, 81,90% da DQO e 80,62% da DBO. Pode-se observar que o aumento de pressão reduz o tamanho da microbolha e a eficiência da FAD depende da quantidade e do tamanho das microbolhas que são formadas na zona de contato. A relação da concentração de microbolhas na zona de separação do flotor em função da sua profundidade e do diâmetro das microbolhas define que quanto menor o diâmetro médio das microbolhas, maior a concentração de bolhas no flotor mesmo em flotores com zona de separação rasa, característica favorável à remoção das partículas em FAD.

Desta forma, a qualidade de geração de microbolhas em um processo de FAD varia de acordo com a temperatura em que o sistema se encontra. Como a constante de Henry é inversamente proporcional à temperatura, a baixas temperaturas a solubilidade do ar na água será maior, e a altas temperaturas a solubilidade é menor, tendo que ser compensado com o aumento de vazão e pressão no sistema, mas com excesso de pressão, pode haver o rompimento das microbolhas, não havendo uniformidade no tamanho das microbolhas prejudicando o processo, (CHEN; WANG; YANG, 2016), o que é possível de ser observado quando se aumentou a pressão para 6 atm no ensaio. A colisão de bolhas de partículas nesses sistemas é controlada principalmente pela hidrodinâmica de diferentes compartimentos. Muitos estudos experimentais confirmaram que a eficiência de colisão de partículas de bolha aumenta com a diminuição do tamanho da bolha e a diminuição da velocidade de ascensão da bolha (HUANG, 2017). No entanto, há uma compensação para isso, pois as bolhas de ar menores têm o problema de baixo poder de elevação e maior tempo de retenção (baixa taxa de separação) devido às baixas velocidades de ascensão da bolha (TEMESGEN, 2017). Além disso, verificou-se que, ao

ampliar a distribuição do tamanho das bolhas, podem ser obtidas melhores eficiências de flotação. A flotação por ar dissolvido (FAD) é uma das tecnologias mais comprovadas que tem sido usada na indústria para separação líquido-sólido usando microbolhas.

O ensaio 2 foi realizado com a dosagem de 1,0 mg pol./g SST e é possível observar que com aumento da dosagem de polímero, houve uma melhora na remoção dos parâmetros analisados. Na pressão de 5,5 atm, houve remoção de 77,37% na turbidez, 89,42% na cor, 88,53% nos SST, 97,73% no alumínio, 97,28% no ferro, 81,91% no manganês, 84,76% na DQO 84,76% e 81,46% na DBO.

Nos ensaios 3, 4 e 5, é possível observar que com o aumento da dosagem de polímero o percentual de remoção foi maior. Nesses testes, as dosagens foram de 1,5-2,0-2,5 mg pol./g SST e os melhores resultados sempre ocorreram na pressão de 5,5 atm. Os resultados com a pressão de 6 atm mostraram resultados pouco inferiores à pressão de 5,5 atm, demonstrando que um aumento de pressão não garante uma melhor eficiência no tratamento.

No ensaio 6, foram encontrados os melhores resultados de remoção: 98% na turbidez, 99,04% na cor, 99,98% nos SST, 99,92% no alumínio, 99,92% no ferro, 99,91% no manganês, 97,45% na DQO 93,10% e na DBO 96,46%. Pode-se observar que na aplicação de microbolhas modificadas por polímero, as interações polímero-bolha-resíduo revestem e funcionalizam para gerar microbolhas carregadas positivamente que são atraentes para partículas carregadas negativamente, provocando a mínima coalescência, com a camada flutuante desprovida de grandes bolhas coalescentes (RITA; SIMON; BRUCE, 2010).

Tabela 11 - Resultados de turbidez, cor, sólidos solúveis totais, concentrações de alumínio, ferro, manganês, Demanda Química de Oxigênio e Demanda Bioquímica de Oxigênio Dissolvido e teor de sólidos no lodo flotado dos ensaios no Floco-floculador de Ar com o lodo da Estação de Tratamento de Água de Tapacurá Tratamento de Água de Tapacurá

ENSAIOS REALIZADOS NO FLOCO-FLOTADOR PILOTO																											
DOSAGEM DE POLÍMERO (mg pol/g SST)	PRESSÃO (ATM)	% RECIRCULAÇÃO	TURBIDEZ (uT)			COR (pT)			SST (mg/l)			ALUMÍNIO (mg/l)			FERRO (mg/l)			MANGANÊS (mg/l)			DQO(mg/l)			DBO (mg/l)			TEOR DE SÓLIDOS NO LODO FLOTADO (%)
			Aflente	Eflente	% de remoção	Aflente	Eflente	% de remoção	Aflente	Eflente	% de remoção	Aflente	Eflente	% de remoção	Aflente	Eflente	% de remoção	Aflente	Eflente	% de remoção	Aflente	Eflente	% de remoção	Aflente	Eflente	% de remoção	
0,5	5	40	190	62	67,36842105	520	102	80,38461538	654	120	81,65137615	220	15	93,18181818	147	18	87,75510204	4,7	2,2	53,19148936	42	11	73,80952381	480	205	57,29166667	3,1
	5,5		190	47	75,26315789	520	64	87,69230769	654	85	87,0030581	220	7,2	96,72727273	147	6	95,91836735	4,7	1,2	74,46808511	42	7,6	81,9047619	480	93	80,625	
	6		190	52	72,63157895	520	84	83,84615385	654	97	85,16819572	220	10	95,45454545	147	7	95,23809524	4,7	1,6	65,95744681	42	8,1	80,71428571	480	120	75	
1,0	5	40	190	50	73,68421053	520	83	84,03846154	654	110	83,18042813	220	11,6	94,72727273	147	7	95,23809524	4,7	1,8	61,70212766	42	10,2	75,71428571	480	192	60	3,4
	5,5		190	43	77,36842105	520	55	89,42307692	654	75	88,53211009	220	5	97,72727273	147	4	97,27891156	4,7	0,85	81,91489362	42	6,4	84,76190476	480	89	81,45833333	
	6		190	45	76,31578947	520	77	85,19230769	654	91	86,08562691	220	8	96,36363636	147	6	95,91836735	4,7	1,2	74,46808511	42	7,1	83,0952381	480	114	76,25	
1,5	5	40	190	42	77,89473684	520	61	88,26923077	654	95	85,47400612	220	9	95,90909091	147	5	96,59863946	4,7	1,45	69,14893617	42	9,7	76,9047619	480	185	61,45833333	3,54
	5,5		190	28	85,26315789	520	44	91,53846154	654	51	92,20183486	220	3	98,63636364	147	2	98,63945578	4,7	0,62	86,80851064	42	5,4	87,14285714	480	81	83,125	
	6		190	31	83,68421053	520	42	91,92307692	654	64	90,21406728	220	6	97,27272727	147	3,7	97,4829932	4,7	0,87	81,4893617	42	6,1	85,47619048	480	110	77,08333333	
2,0	5	40	190	30	84,21052632	520	33	93,65384615	654	51	92,20183486	220	5	97,72727273	147	3	97,95918367	4,7	1,32	71,91489362	42	9,5	77,38095238	480	172	64,16666667	3,79
	5,5		190	19	90	520	27	94,80769231	654	18	97,24770642	220	2	99,09090909	147	0,9	99,3877551	4,7	0,54	88,5106383	42	5,1	87,85714286	480	78	83,75	
	6		190	27	85,78947368	520	28	94,61538462	654	22	96,63608563	220	3,5	98,40909091	147	1,5	98,97959184	4,7	0,71	84,89361702	42	5,9	85,95238095	480	99	79,375	
2,5	5	40	190	26	86,31578947	520	26	95	654	34	94,80122324	220	2	99,09090909	147	2	98,63945578	4,7	0,84	82,12765957	42	9,1	78,33333333	480	157	67,29166667	3,87
	5,5		190	12	93,68421053	520	18	96,53846154	654	14	97,85932722	220	0,5	99,77272727	147	0,4	99,72789116	4,7	0,31	93,40425532	42	4,8	88,57142857	480	51	89,375	
	6		190	17	91,05263158	520	14	97,30769231	654	19	97,09480122	220	0,9	99,59090909	147	0,56	99,61904762	4,7	0,43	90,85106383	42	5,7	86,42857143	480	67	86,04166667	
3,0	5	40	190	14	92,63157895	520	12	97,69230769	654	10,5	98,39449541	220	0,45	99,79545455	147	0,7	99,52380952	4,7	0,4	91,4893617	42	8,4	80	480	102	78,75	4,1
	5,5		190	3,8	98	520	5	99,03846154	654	6,7	98,97553517	220	0,17	99,92272727	147	0,12	99,91836735	4,7	0,12	97,44680851	42	2,9	93,0952381	480	17	96,45833333	
	6		190	4,9	97,42105263	520	8	98,46153846	654	7,4	98,86850153	220	0,27	99,87727273	147	0,25	99,82993197	4,7	0,21	95,53191489	42	4,3	89,76190476	480	47	90,20833333	

Fonte: Autor (2023)

Tabela 12 - Resultados de turbidez, cor, sólidos solúveis totais, concentrações de alumínio, ferro, manganês, Demanda Química de Oxigênio e Demanda Bioquímica de Oxigênio e teor de sólidos no lodo flotado dos ensaios no Floco-floculador de Ar Dissolvido, utilizando pressão de 5,5 atm

RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NA FFAD COM PRESSÃO DE 5 ATM E TAXA DE RECIRCULAÇÃO DE 40%																											
DOSAGEM DE POLÍMERO (mg pol/g SST)	PRESSÃO (ATM)	% RECIRCULAÇÃO	TURBIDEZ (unT)			COR (pT/l)			SST (mg/l)			ALUMÍNIO (mg/l)			FERRO (mg/l)			MANGANÊS (mg/l)			DQO(mg/l)			DBO (mg/l)			TEOR DE SÓLIDOS NO LODO FLOTADO (%)
			Afluente	Efluente	% de remoção	Afluente	Efluente	% de remoção	Afluente	Efluente	% de remoção	Afluente	Efluente	% de remoção	Afluente	Efluente	% de remoção	Afluente	Efluente	% de remoção	Afluente	Efluente	% de remoção	Afluente	Efluente	% de remoção	
0,5	5,5	40	190	47	75,26315789	520	64	87,69230769	654	85	87,0030581	220	7,2	96,72727273	147	6	95,91836735	4,7	1,2	74,46808511	42	7,6	81,9047619	480	93	80,625	3,1
1,0			190	43	77,36842105	520	55	89,42307692	654	75	88,53211009	220	5	97,72727273	147	4	97,27891156	4,7	0,85	81,91489362	42	6,4	84,76190476	480	89	81,45833333	3,4
1,5			190	28	85,26315789	520	44	91,53846154	654	51	92,20183486	220	3	98,63636364	147	2	98,63945578	4,7	0,62	86,80851064	42	5,4	87,14285714	480	81	83,125	3,54
2,0			190	19	90	520	27	94,80769231	654	18	97,24770642	220	2	99,09090909	147	0,9	99,3877551	4,7	0,54	88,5106383	42	5,1	87,85714286	480	78	83,75	3,79
2,5			190	12	93,68421053	520	18	96,53846154	654	14	97,85932722	220	0,5	99,77272727	147	0,4	99,72789116	4,7	0,31	93,40425532	42	4,8	88,57142857	480	51	89,375	3,87
3,0			190	3,8	98	520	5	99,03846154	654	6,7	98,97553517	220	0,17	99,92227272	147	0,12	99,91836735	4,7	0,12	97,44680851	42	2,9	93,0952381	480	17	96,45833333	4,1
MÉDIA					25,467			35,500			41,617			2,978			2,237			0,607			5,367			68,167	
DESVIO PADRÃO			17,147			22,687			33,539			2,716			2,322			0,385			1,583			29,068			0,359
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO			67,33%			63,91%			80,59%			91,21%			103,83%			63,44%			29,50%			42,64%			9,89%

Fonte: Autor (2023)

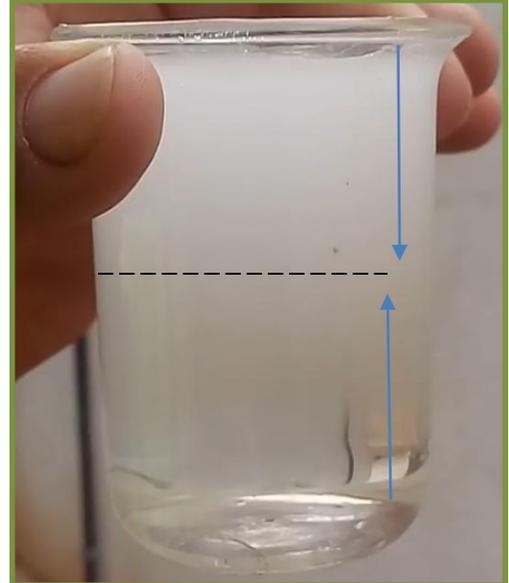
Na figura 37 pode-se observar a amostra da água saturada de oxigênio coletada no tanque de flotação, enquanto a separação entre a zona de contato pode ser visualizada na figura 38 onde ocorrerá a flotação e separação sólido-líquido (RICHTER, 2009). Na figura 39 pode-se observar o efeito da floco-flotação com a remoção dos resíduos. Na figura 40, após a operação no FFAD, é possível identificar o lodo adensado.

Figura 35 – Flotação – Zona de contato



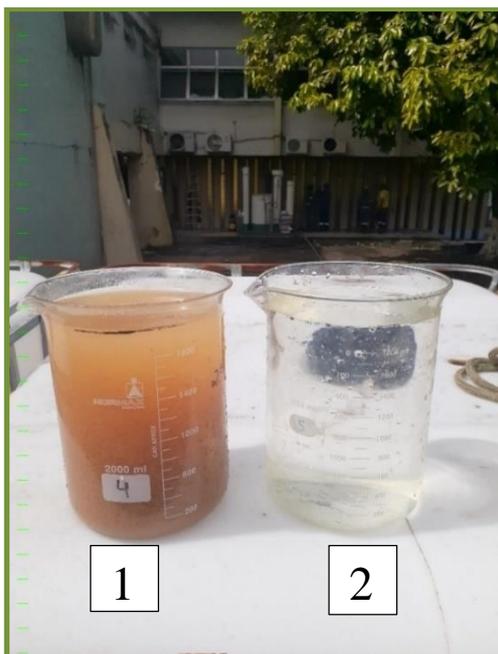
Fonte: Autor (2023)

Figura 36 – Interface – Zona de separação



Fonte: Autor (2023)

Figura 37 – Resíduo gerado na Estação de Tratamento de Água Tapacurá (1) e Água clarificada pós tratamento na unidade piloto (2)



Fonte Autor (2023)

Figura 38 – Lodo após adensamento no Floco-flotador de ar dissolvido piloto, utilizando pressão de operação de 5,5 atm e dosagem de polímero de 3,0 g pol/ kg SST



Fonte: Autor (2023)

5.4 ETAPA 6 – Verificação se as variáveis de qualidade da água clarificada estão de acordo com os padrões de lançamento de efluentes ou integração á água bruta no início da ETA conforme Resolução CONAMA nº 430/2011.

Realizou-se a avaliação do atendimento da água clarificada nos ensaios quanto aos padrões de lançamentos em corpos hídricos conforme a Resolução CONAMA nº 430/11, e a possibilidade de retorno ao início o do tratamento.

5.4.1 Turbidez

Os valores referentes a turbidez obtidos nos ensaios na unidade piloto estão apresentados na Figura 43. Observa-se que a turbidez no tanque de equalização apresentou diferenças quando comparadas às amostras utilizadas na etapa 2, as quais apresentavam turbidez superiores a 190 unT. Na etapa de testes piloto, a turbidez no tanque de equalização para os seis ensaios realizados foi inferior. De acordo com a Resolução nº 357/05 (BRASIL, 2005), a qual estabelece o padrão de qualidade para corpos de água, tem-se, para corpos de água doce classe II, valor máximo de turbidez permitido igual a 100 uT. Dessa forma, ao observar a Figura 43, percebe-se que a após os ensaios, o percentual de remoção da turbidez variou de 67,37% a 98,00%, com turbidez variando de 62 a 3,8 uT e os melhores resultados ocorreram com dosagem de 3,0 pol g / kg SST, atendendo ao padrão de qualidade exigido, demonstrando, portanto, que o efluente da FFAD atende à referida legislação. Com relação à aplicação da pressão, o valor que apresentou resultado satisfatório no ensaio de adensamento do lodo por FFAD, foi de 5,5 atm, pois ao término do ensaio não se verificou a formação de material sedimentado, diferente do que ocorreu para as pressões de 5,0 e 6,0 atm. O excesso de pressão, a depender o tipo de resíduo a ser tratado, pode gerar instabilidade das microbolhas formadas (SHER; MALIK; LIU, 2013).

5.4.2 Cor

Conforme a resolução do CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005), são aceitos valores de até 75 uH nos corpos hídricos de classe II. Dessa forma, os valores de cor do clarificado gerados na FFAD atendem à legislação específica, com exceção do primeiro ensaio com percentual de remoção de 80,38%. Mesmo com esse percentual, pode-se, com segurança incorporar a água ao início do tratamento. A maioria das moléculas orgânicas que contribuem para a cor da água, que são aniônicas (têm carga negativa), e a carga catiônica do PolyDADMAC permite que ele

se ligue fortemente a essas moléculas, formando flocos que são facilmente removidos por sedimentação ou flotação (LIU; WANG; WANG, 2021)

5.4.3 Sólidos Solúveis Totais (SST)

O percentual de remoção de SST foi de 81,65% a 98,97%. Os melhores percentuais de remoção foram com a pressão de 5,5 atm e dosagem de polímero de de 3,0 pol g / kg SST. A associação das tecnologias de floculação em bandejas, aplicação de polydadmac e flotação é uma combinação eficaz na remoção de SST do lodo, pois permite a separação de partículas sólidas de tamanho pequeno a médio, que não são facilmente removidas por outros processos de tratamento de água ou efluentes (SOLEIMANI; KAMYAB; ESMAEILI, 2018).

5.4.4 Alumínio

Apesar de o alumínio ser necessário ao tratamento de água, o mesmo exerce papel de destaque face às suas potenciais ações tóxicas, sendo necessário manter-se um monitoramento da presença e quantidade quanto à disposição e reutilização dos resíduos de ETA (BABATUNDE; ZHAO, 2007). O melhor resultado e o que mais se aproximou ao exigido pela legislação (0,2 ppm) foi o percentual de remoção com 99,92%, tendo como concentração de alumínio. 0,17 mg/L, descumprindo a citada legislação. Entretanto, o atendimento da água clarificada quanto a este parâmetro, demonstra a possibilidade de reaproveitamento desta água para o início da ETA, haja vista que a concentração de alumínio encontrado atende ao limite de 0,20 mg/l exigida pela Portaria nº Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Contudo, estudos adicionais de balanço de massa devem ser realizados (CHAVES; SALES; NETO JOSÉ, 2015).

5.4.5 Ferro

Dos ensaios realizados, apenas o primeiro não atende à legislação pertinente (CONAMA 430/2011), visto que remoção de ferro foi de 87,75% (concentração afluente = 147 mg/L, após o tratamento foi de 18 mg/L). Os demais resultados atenderam a Resolução CONAMA 430/2011 para lançamentos nos corpos hídricos, conferindo segurança à reutilização da água, desde que tenha um tratamento eficiente principalmente no mecanismo de coagulação. A maior fração de ferro nos resíduos gerados nas ETA está na forma solúvel, com micropartículas carregadas negativamente e a aplicação de um polímero modificador de superfície é o

facilitador para adesão microbolha-partícula, com boa performance na remoção do ferro insolúvel. A fração de ferro solúvel é facilmente convertida em insolúvel por conta da presença do ar dissolvido (CHEN; WANG; YANG, 2016).

5.4.6 Manganês

O tratamento com o FFAD piloto teve uma performance na remoção do manganês do LETA de Tapacurá de 53,19% a 97,44%. O manganês é um metal de complexo tratamento. É importante ressaltar a correlação entre a remoção da cor aparente e a das concentrações de ferro, devido à forte ligação do ferro com a matéria orgânica presente na forma de substância húmica, responsável por conferir cor, conseguindo ter uma remoção eficiente de ferro conseqüentemente há uma remoção de cor. Com relação ao manganês, as condições de flotabilidade dos flocos inorgânicos de dióxido de manganês não foram boas e não influenciou de maneira significativa na eficiência de remoção deste metal, provavelmente por não estar tão fortemente ligado à matéria orgânica como no caso do ferro, conforme observado por Moruzzi (2008). Os valores que atenderam à legislação foram obtidos a partir do segundo ensaio e sempre com a aplicação da pressão de 5,5 atm. Os resultados atenderam a legislação pertinente, para lançamento em corpos hídricos, além de permitir a recirculação do clarificado para o início da unidade de tratamento.

5.4.7 DBO e DQO

Durante os ensaios na unidade piloto foram observadas eficiências máxima e mínima, de remoção de DQO e DBO respectivamente de 73,80 a 93,09% e 57,29 a 96,46%. A legislação brasileira, especificamente a resolução do CONAMA 357/2005, estabelece em 5,0 mg/L como o valor máximo para a concentração da DBO em um curso de água doce classe 2. A DQO é um parâmetro indispensável nos estudos de caracterização de efluentes de ETA, de efluentes industriais e também de cursos d'água, pois além de possibilitar a avaliação da biodegradabilidade da matéria orgânica, quando utilizado conjuntamente com a DBO, possibilita avaliar, mesmo que de forma preliminar, a origem dos despejos (RUBIO, 2002).

Como o lodo tem um valor muito elevado de DBO, após os ensaios, os valores ficaram muito acima de 5 mg/L, isto é, não pode ser lançamento em corpos hídricos Classe 2. O que não desmerece o uso da água clarificada para outros fins.

A relação DQO/DBO indicou a presença de compostos menos biodegradáveis no LETA, conforme apresentado na sua caracterização. A DQO/DBO indica o quanto a amostra pode sofrer degradação biológica: resultados acima de 2,5 indicam menor susceptibilidade da amostra, enquanto valores abaixo de 2,5 indicam maiores chances da amostra ser degradada biologicamente (DEZOTTI, 2008). Estudos mostram que a FFAD é reconhecida por ser um dos mais econômicos e efetivos métodos de recuperação e remoção de sólidos, íons, microrganismo, redução da DQO e DBO e espessamento de lodo no tratamento de efluentes de ETA e ETE urbanos (RUBIO; TESSELE, 2002).

5.4.8 Teores de sólidos no lodo flotado

Nos ensaios, os resultados na análise de teor de sólidos de lodo flotado atenderam os valores requeridos para o mercado das tecnologias que variam de 3% á 8% de lodo adensado (RITCHER, 2001). que são aplicadas para desague do lodo (3,1% a 4,1%). A melhor pressão de operação foi a de 5,5 atm e estudos mostram que pressões acima de 600 kPa pouco influenciam no tamanho das bolhas. Pressões de saturação maiores que 600 kPa resultam no aumento da taxa de aglutinação das microbolhas no momento da despressurização, diminuindo, dessa forma, a produção efetiva de bolhas adequadas à flotação (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

Na comparação de resíduos a base de alumínio e ferro, os resíduos de cloreto férrico como coagulante, tendem a desaguar mais rapidamente, do que os resíduos de alumínio (VERRELLI, 2008). Por este motivo, é de suma importância a aplicação correta da dosagem do polímero, visto que a dificuldade de remoção de água dos resíduos com excesso de polímero é o fato de que muitos desses polímeros tem comportamento hidrofílicos, fazendo com que os flocos tenham a umidade aumentada (BHATIA *et al.*, 2013).

5.5 ETAPA 7 – Avaliação das possibilidades de disposição final do LETA oriundo da ETA Presidente Castello Branco.

A etapa de adensamento é importante para reduzir o teor de água no lodo e aumentar sua concentração de sólidos, o que facilita o manuseio e o transporte do lodo para etapas subsequentes (LEWANDOWSKI, 2019). A seleção da tecnologia a ser aplicada influencia no processo de tratamento do LETA, para os resíduos gerados na ETA Presidente Castello Branco a associação de tecnologias foi a altrnativa.

O lodo pode ter várias formas de disposição, tais como: aterros sanitários (teor de sólidos >30%); disposição controlada em certos tipos de solos, desde que atenda as condicionantes legais ambientais; co-disposição com biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos, incineração dos resíduos, lançamento na rede coletora de esgoto, bem como aplicações industriais diversas tais como fabricação de tijolos ou outros materiais de construção (METCALF & EDDY, 2013). Para essas aplicações devem ser analisadas as viabilidades técnica, econômica e ambiental.

Para a escolha do destino do lodo deve-se atentar ao teor de sólidos nele presente. Cada uma dessas alternativas de disposição final ou uso benéfico exige um determinado processo de tratamento do lodo, para atingir determinadas características de seus resíduos(.

A qualidade do lodo adensado pode influenciar na disposição final do lodo (RUBIO; TESSELE, 2002).

A qualidade do lodo adensado é avaliada com base em diferentes parâmetros, como teor de matéria orgânica, teor de metais pesados, presença de patógenos, conteúdo de nutrientes e estabilidade do lodo (LEWANDOWSKI, 2019). Esses parâmetros são importantes para determinar a viabilidade e a adequação de cada opção de disposição final.

Se o lodo adensado contiver altos níveis de contaminantes, como metais pesados, substâncias tóxicas ou patógenos, sua disposição direta no solo através da aplicação agrícola pode não ser recomendada, pois pode causar poluição do solo e contaminação de culturas agrícolas. Nesse caso, outras opções, como a incineração, podem ser mais adequadas para reduzir os riscos ambientais (RICHTER, 2009).

Da mesma forma, se o lodo adensado tiver uma baixa estabilidade, o que significa que é biologicamente ativo e pode gerar odores desagradáveis e liberar gases tóxicos durante o processo de disposição, a co-disposição em aterros sanitários ou a disposição oceânica podem ser preferíveis.

Portanto, a qualidade do lodo adensado desempenha um papel fundamental na determinação da melhor opção de disposição final. É importante realizar análises laboratoriais e avaliações de risco adequadas para garantir que o lodo seja tratado e disposto de forma segura e ambientalmente sustentável (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

O lodo adensado na unidade piloto de FFAD, instalada na ETA Presidente Castello Branco, teve desempenho satisfatório para ser submetido as etapas subsequentes de tratamento do LETA. A composição química do lodo (alto teor de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3) tem sido estudada por pesquisadores como alternativa para ser utilizado na indústria cimenteira (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os mananciais que abastecem a ETA Tapacura / Presidente Castelo Branco, em alguns meses do ano (período de estiagem) estão eutrofizados, o que dificulta tanto o tratamento da água para consumo humano, assim como a do resíduo gerado. O LETA que é gerado é habitualmente destinado de forma inapropriada, muitas vezes exposto ao ambiente e lançados aos cursos d'água próximos às estações. No projeto da unidade de tratamento do LETA as características da água bruta a ser tratada estão diretamente associadas as características do resíduo gerado, LETA com altas concentrações de algas apresentam piores condições para adensamento e desaguamento. Por este motivo foi desenvolvida uma unidade piloto para testes na etapa de adensamento de tratamento do LETA. A caracterização qualitativa do lodo da ETA Tapacurá demonstrou que este resíduo se constitui principalmente de sólidos em suspensão, apresentando elevada cor, turbidez contagem para Coliformes e alta fração de material inerte e altas proporções de sólidos sedimentáveis e sólidos suspensos totais (SST). Conforme estabelecido na NBR 10.004 de 2004, na seleção do aterro sanitário como método de disposição, deve-se considerar que as condições anaeróbicas que podem produzir ácidos voláteis, os quais diminuem o pH do meio, permitindo a dissolução do alumínio e outros metais presentes nos resíduos, os quais podem causar problemas á saúde pública e ao meio ambiente se houver infiltração no solo, o LETA da ETA Tapacurá é classificado como Classe II A – Não perigoso e Não Inerte, por apresentar concentrações de alumínio, ferro e manganês superiores aos limites estabelecidos pela resolução CONAMA 430/2011.

Atenderam aos padrões ambientais vigentes quanto ao lançamento em corpo hídrico classe II, e resolução CONAMA nº 430/2011 e nº 357/05 do CONAMA, os resultados referentes aos parâmetros pH, sólidos sedimentáveis, DBO, DQO, temperatura, E. Coli, zinco, fósforo e chumbo. Os parâmetros de cor, turbidez, sólidos sedimentáveis, alumínio, ferro e manganês não atenderam as legislações vigentes havendo a necessidade de tratamento através de uma tecnologia que após o tratamento atenda aos padrões para lançamento em corpos hídricos. Para evitar contaminação e um grande impacto ambiental por se tratar de um material tóxico.

Com os ensaios de bancada foi possível determinar a a melhor dosagem de polímero, melhor taxa de aplicação, taxa de recirculação e gradiente, sendo os melhores resultados obtidos com dosagem de polímero de 3 pol g/ kg SST e pressão de 5,5 atm. A aplicação de um polímero modificador de superfície nos ensaios foi determinante para a eficiência na floculação seguido da flotação. Outro fator que influenciou na qualidade durante a flotação foi as torres em serpentina que proporcionaram uma maior eficiência durante a flotação (YUSOFF *et al.*, 2014).

A resistência específica no lodo adensado por FAD, foram elevadas, demonstrando a baixa capacidade de filtração do lodo, contudo a adição de polímeros auxiliou na diminuição da resistência específica do lodo, a RE no lodo bruto sem condicionamento químico foi elevada, demonstram a baixa capacidade de filtração do lodo, contudo a adição de polímeros auxiliou na diminuição da resistência específica facilitando o tratamento no FFAD.

Os resultados obtidos na unidade de floco flotação piloto apresentaram elevada eficiência para o tratamento de lodo gerado em ETA's que tratam águas eutrofizadas, os melhores resultados foram obtidos quando foi aplicada a pressão de 5,5 atm, taxa de recirculação fixa de 40%, e dosagem de polímero variando de 0,5 a 3,0 pol g/ kg SST. Os percentuais de remoção de turbidez com essas variáveis foram de 75,26 á 98% para turbidez, 87,69 á 99,03% para cor, 87 á 98,97% para SST, 96,72 Á 99,92% para alumínio, 74,46 á 97,44% para manganês, 95,91 á 99,91 para ferro, 81,90 á 93,09 para DQO e 80,62 á 96,45 para DBO. Com a aplicação da pressão de 5,0 atm a flotação se tornou parcial, sendo observado o efeito de sedimentação, o mesmo ocorrendo na pressão de 6,0 atm, que embora forme um tamanho de bolha menor que facilita a ascensão do floco, as microbolhas provavelmente sofriam aglutinação formando bolhas irregulares que prejudicavam a flotação, efeito de coalescência. O tamanho e a distribuição das microbolhas são cruciais para o desempenho da FAD. Se houver excesso de pressão, as microbolhas podem se juntar e formar bolhas maiores, reduzindo a área superficial de contato e a eficiência do processo de remoção de partículas. Além disso, a formação de bolhas maiores também pode levar à sedimentação dos flocos, em vez de sua flutuação, o que diminui a eficiência do processo (LIU *et al.*, 2019). Diante dos dados apresentados podemos concluir que a água clarificada pode ser lançada em corpo receptor atendendo as legislações vigentes, assim como pode ser recirculada para o início da ETA. Atualmente a ETA Tapacurá tem uma perda de água com as operações de lavagem e descarga de 6,85% do volume produzido, bem acima do recomendado que é de 4%. Com a água clarificada atendendo os padrões recomendados a economia de água seria de suma importância frente a crise hídrica que enfrentamos.

O teor de sólidos no lodo flotado variando de 3,1 à 4,1 %, atende o que é requerido para as tecnologias de desague existente, uma das grandes preocupações das concessionárias de saneamento é a seleção das tecnologias de desague a ser aplicada, que onera os custos das empresas. Com o teor de sólidos na etapa de tratamento com FFAD atendendo a todas tecnologias de desague, é possível utilizar a tecnologia das mantas geotexteis, que são de ótima de qualidade e custo, mas requerem um teor de sólidos de 0,5% na época de estiagem (RITCHER, 2001), principalmente para unidades que possuem como características baixa cor e turbidez. O lodo com essas características após o adensamento, facilitam o desague e conseqüentemente a disposição

final. Diante dos resultados apresentados nos ensaios com a unidade piloto como etapa de adensamento para o LETA gerado na ETA Tapacurá, que tem como concepção a associação de duas tecnologias (floculadores e bandejas + flotação por ar dissolvido), pode-se afirmar que a tecnologia testada pode trazer qualidade na água clarificada que permitirá que seja lançada ao corpo receptor ou recirculada para o início do tratamento, sem gerar impactos ambientais severos nem alterar a qualidade da água que será tratada na ETA. A realização de tratamentos de resíduos utilizando técnicas e tecnologias apropriadas, pode-se garantir a não poluição dos canais aquáticos essenciais para a vida animal e humana, e reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso. Com isso, além de colaborar com o atendimento as ODS 06 e ODS 12, as empresas também ficam alinhadas a legislação, visto que a meta 12.5 a qual visa até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso, bem como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estão intimamente ligadas e incentivam a prevenção, redução, reciclagem e reutilização no que diz respeito a geração de resíduos. Infelizmente tem pouco interesse e investimento em pesquisas e estudos sobretudo no Brasil para reutilização dos resíduos de ETAS, porém já há estudos comprovados que permitem a transformação dos lodos em produtos com alto valor agregado, que além de reduzir os gastos com destinação em aterros, podem gerar lucros com a comercialização desses resíduos.

O ODS 12 obriga que as empresas responsáveis pela produção dos lodos redesenhem seus processos, inovando em toda a cadeia de valor para reduzir a geração de resíduos, reciclar os resíduos e eliminar o aterro. Com relação à ODS 2, a utilização do lodo como adubo agrícola pode fornecer nutrientes para o solo, melhorando sua qualidade e aumentando a produtividade agrícola. Além disso, a reciclagem de nutrientes do lodo de ETA pode ajudar a reduzir a necessidade de fertilizantes químicos, que muitas vezes são produzidos com altos gastos energéticos e emitem gases de efeito estufa.

Já a utilização do lodo como combustível pode contribuir para a ODS 7, que busca garantir energia limpa e acessível para todos. O lodo pode ser transformado em biocombustível por meio de processos de digestão anaeróbia e gasificação, reduzindo a necessidade de combustíveis fósseis e diminuindo as emissões de gases poluentes. Além disso, a geração de energia a partir do lodo pode ser uma alternativa para a destinação adequada do resíduo, evitando o seu acúmulo em aterros sanitários e contribuindo para a redução do impacto ambiental.

O LETA pode ser usado como cimento, na indústria de cerâmica vermelha reaproveitamento do lodo de Estações de Tratamento de Água com uso direto na construção civil, como de concreto não estrutural. Além disso, na maioria dos casos ocorre a redução no consumo

de matérias-primas naturais, como areia, brita e cimento minimizando o impacto ambiental, uma vez que haverá uma diminuição da extração dos minérios e argila nas jazidas e redução do lodo lançado em rios e córregos.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23th Edition, 2017.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **American society of Civil Engineers – ASCE Process residuais**. In: AWWA: ASCE. Water treatment plant design. USA: McGraw – Hill Handbooks, 1998.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Water treatment plant residuais management**. In: AWWA. Water quality & treatment: A handbook of community water supplis. 5. ed. USA: American water works Association, 1999.
- ANDRADE, L. N. Autodepuração dos corpos d'água. **Revista da Biologia**, Vitória, ES, v. 5, p. 10-12, 2010.
- ANDREOLI, C. V. **Lodo de estações de tratamento de água: gestão e perspectivas tecnológicas**. 1. ed. Curitiba: Sanepar, 2013.
- ArcGIS Pro 2.8. Esri Inc. Redlands, CA, USA: 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12216: Projeto de estações de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- AYOL, A.; DENTEL, S. K.; FILIBELI, A. Dual polymer conditioning of water treatment residuals. **Journal Environmental Engineering**, v. 2005.
- BABATUNDE, A. O.; ZHAO, Y. Q. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial re-uses. **Journal Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 37, n. 2, p. 129-164, 2007.
- BARROSO, Marcelo M.; ACHON, Cali, L.; REIS, Renan F.; CORDEIRO, João S. **Drainage Bed: A Natural System for WTP Sludge Dewatering and Drying with Different Coagulant Chemicals in Tropical Countries**, 2012.
- BHATIA, S.K.; SUMATHI, S.; RAO, N.S. Enhanced coagulation and flocculation studies with alum and polyaluminum chloride (PAC) using response surface methodology. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 1, p. 1193-1203, 2013.
- BENJAMIN, Antônio Hermam. O meio ambiente na Constituição Federal de 1988. In: KISHI, Sandra A. S., *et al.* **Desafios do Direito Ambiental no Século XXI**. São Paulo: Malheiros, 2005.
- BESSA, R. S. V.; GOMES, H. B. L.; SOUZA, M. T. A. Avaliação do Desempenho de Diferentes Tecnologias de Tratamento de Lodo de ETA em Uma Estação de Tratamento de Água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 1, 2021.
- BITTENCOURT, Simone *et al.* Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de

tratamento de esgoto em solo degradado. **Revista Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 17, n. 3, 2012.

BOTERO, W.; DOS SANTOS, A.; OLIVEIRA, L.; ROCHA, J. Caracterização de Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água: Perspectivas de Aplicação Agrícola. **Química Nova**, vol. 32, n. 8, p. 2018-2022, 2009.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República, [2016]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 20 jun. 2021.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº. 001, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 17 fev. 1986.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº. 237, de 22 de dezembro de 1997. Regulamenta os aspectos de licenciamento ambiental estabelecidos na Política Nacional do Meio Ambiente. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 22 dez. 1997.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Seção 1, p. 1.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 de março de 2005.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº. 430/2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente, Brasília: CONAMA, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 12 de fevereiro de 1998.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Lei nº 11.445 de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 05 de janeiro de 2007.

CAMPOS, J. C.; LAMAS, W.T.; BEZERRA, B. S.; SOUZA, T. R. Avaliação da desidratação de lodos de estação de tratamento de água por lodo adensado. **Revista DAE**, 2019.

CARNEIRO, M. C. M.; AMARAL, D. S.; SANTOS, L. F. M.; MARCO, JUNIOR, M. A. T. G.; PINHEIRO, M. T. A gestão do saneamento no Brasil e sua relação com a gestão de recursos hídricos. **INOVAE**, v. 6, 2018.

CARVALHO, M. H. **Apostila Lodo – ETA escola**. São Bernardo do Campo, 2018.

CAVAZZANA, T. L.; MATSUMOTO, T.; LIBÂNIO, M. Avaliação da floco-decantação de manta de lodo associada à decantação de alta taxa no tratamento de águas de consumo humano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 126-136, 2008.

CHAVES, K. O.; SALES, M. V.; NETO, J. C. Eficiência da floculação em cortinas integrada à flotação por ar dissolvido aplicada ao tratamento das águas de lavagem de filtros. **Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 8, p. 312-327, 2015.

CHEN, A.; WANG, Z.; YANG, J. Influence of bubble size on the fluid dynamic behavior of a daf tank: A 3d numerical investigation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 495, p. 200-207, 2016.

CHEN, B.-H.; LEE, S.-J.; LEE, D. J., Rheological characteristics of the cationic polyelectrolyte flocculated wastewater sludge. **Water Research**, v. 39, n. 18, 2005. (Conditioning of alum sludge and discrepancies between estimates of the optimum).

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO. **Relatório de Sustentabilidade** da COMPESA. Recife: COMPESA, 2021.

CORDEIRO, J. S. Precariedades e Desafios do Saneamento Ambiental. **CRESCER BRASIL + ENGENHARIA DESENVOLVIMENTO - CIDADES**, Brasília. 2016.

CUNHA, G. D.; LIMA, J. S. V.; STACHIW, R.; TRONCO, K. M. Q. Caracterização e destinação ambientalmente corretas do lodo gerado pelas estações de tratamento de água. **Nature and Conservation**, v.12, n. 2, p.19-30, 2019.

DASSEY, A.; THEEGALA, C. Optimizing the air dissolution parameters in an unpacked dissolved air flotation system. **Water**, v. 4, p. 1-11, 2012.

DEZOTTI, Márcia. **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**. Volume 5 (Série Escola Piloto de Engenharia Química). Rio de Janeiro: Editora Epapers, 2008.

DI BERNARDO, L.; BOTARI, A.; SABOGAL PAZ, L. P. Uso de Modelação Matemática para Projeto de Câmaras Mecanizadas de Floculação em Série em Estações de Tratamento de Água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, 2005.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. v. 1 e 2. São Carlos: RiMa, 2005.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e técnicas de tratamento de água** 3. ed. São Carlos: LDiBe, 2017.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Carlos: Editora LDIBE, 2008. v. 1.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Carlos: Editora LDIBE, 2008. v. 2.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**

em Função do Risco e Eficiência das ETAs. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 1, 2007.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. . **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água**. 1. ed. São Carlos: Editora LDiBe, 2012.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de Água e dos Resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água**. 1. ed. São Carlos: Editora LDiBe, 2011.

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

DI BERNARDO, Luiz; DI BERNARDO, Ângela; CENTURIONE FILHO, Paulo Luiz. Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. Dosage. **Water Science and Technology**, v. 46, n. 10, p. 115-121, 2002.

DONG, Y. J.; WANG, Y. L.; FENG, J. Rheological and fractal characteristics of unconditioned and conditioned water treatment residuals. **Water Research**, v. 45, p. 3871-3882, 2011.

DUAN, J. M.; GREGORY, J. **Coagulation by hydrolysing metal salts**. Advances in Colloid and Interface Science, 2003.

EDZWALD, J. K. Dissolved air flotation and me. **Water Research**, v. 44, 2010.

EDZWALD, J. K. Principles and applications of dissolved air flotation. **Water Science and Technology**, v. 31, 2005.

EDZWALD, J. K.; HAARHOFF, J. **Dissolved Air Flotation for Water Clarification**. 1 edition ed. McGraw-Hill Education, 2011.

ETCHEPARE, R.; OLIVEIRA, H.; AZEVEDO, A.; RUBIO, J., Separation of emulsified crude oil in saline water by dissolved air flotation with micro and nanobubbles. **Separation and Purification Technology**, v. 186, 2017.

FANAIE, V. R., KHIADANI, M.; AYRES, T. Effects of internal geometry on hydrodynamics of dissolved air flotation (DAF) tank: an experimental study using particle image velocimetry (PIV). Colloids and Surfaces A: **Physicochemical and Engineering Aspects**, 2019.

FEITOSA, C. A.; CONSONI, Â. J. Análise de Oportunidades de Minimização da Geração de Lodo na Estação de Tratamento de Água Alto da Boa Vista, São Paulo. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, v. 3, n. 2, p. 1-29, 2008.

FERREIRA FILHO, Sidney Seckler. **Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2020. v. 1.

FERRARIS, C., CARRERA, G., FUMAGALLI, G., RIGOLDI, A.. Waste Sludge from Water Treatment Plants: A Resource to Enhance Water and Energy Efficiency. **Water**, (2018).

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

GHARABAGHI, F., NADDAFI, K., MESDAGHINIA, A., NASSERI, S., MAHVI, A. H., NABIZADEH, R. Removal of oil droplets from wastewater using inclined plate settler and serpentine flotation unit. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2017.

Google Earth - Imagem obtida através do aplicativo, disponível em <https://www.google.com/earth/>. Acesso em: 10 jun. 2022.

GREGORY, R.; ZABEL, T. F. Sedimentation and Flotation. *In*: PONTIUS, F.W. (ed.). **Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies**. 4. ed. 1990.

GUIMARÃES, M.A.A., FERREIRA, M.D.F., GOMES, R.A.T., PRADO, M.S. (). Estudo de caso: análise da eficiência do lodo adensado em estação de tratamento de água. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, v.12, n. 3, p. 435-445, 2019.

HAARHOFF, J.; EDZWALD, J. K. Dissolved air flotation modelling: insights and shortcomings. **Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA**, p. 127-150, 2004.

HAARHOFF, J.; EDZWALD, J. K. Modelling of floc-bubble aggregate rise rates in dissolved air flotation. **Wat. Sci. Tech.**, v. 43, n. 8, p. 175-184, 2001.

HAN, M.; KIM, T.; KIM, J. Effects of floc and bubble size on the efficiency of the dissolved air flotation (DAF) process. **Water Science and Technology**, v. 56, n. 10, 2015.

HAN, C., LI, H., LI, X., LI, C., YANG, H. Flotation of fine particles with hydrophobic flocs using a new kind of water-soluble copolymer flocculant. **Minerals Engineering**, (2017).

HENDERSON R. K.; SIMON, A. Parsons; BRUCE, Jefferson. Surfactantes como modificadores de superfície de bolha na flotação de algas: flotação de ar dissolvido que utiliza uma superfície de bolha quimicamente modificada, **Ambiente. Sci. Tecnol**, 2008.

HENDERSON, R. K.; SIMON, A. Parsons; BRUCE, Jefferson. O Potencial para o uso de produtos químicos de modificação de bolhas em flutuação de ar dissolvido para remoção de algas, **Ciência e Tecnologia de Separação**, 2009.

HESPAÑOL, I. Reúso Potável Direto e o Desafio dos Poluentes Emergentes. **Revista USP**, v. 196, p. 79-94, 2016.

HIBELLER, R.C. **Fluid Mechanics**. First Edition, Malaysia: Pearson Prentice Hall, 2017.

HUANG, G.; XU, H.; WU, L.; LI, X.; WANG, W., Research of novel process route and scale-up based on oilwater separation flotation column, **Journal of Water Reuse and Desalination**, 2017.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, 2021.

JOURNAL OF WATER RESOURCE AND PROTECTION, v. 06, 2014.

KATAYAMA, V. T.; MONTES, C. P.; FERRAZ, T. H.; MORITA, D. M. Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: Uma análise crítica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 4, 2015.

KAWAMURA, S. **Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.

KONDAGESKI, J. H.; CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V.; WEBER, P. S. Pesquisas Interdisciplinares e a estruturação dos estudos da Rede Interinstitucional de Pesquisa em Lodo de Água. In: CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. (coord.). **Lodo de Estações de Tratamento de Água: Gestão e Perspectivas Tecnológicas**. Curitiba: SANEPAR, 2013.

KUMAR, S. S., AL-ANSARI, T., ABDUL-WAHAB, S. A., AZIZ, H. A. Experimental investigation of dissolved air flotation in a serpentine channel for treatment of municipal wastewater. **Journal of Environmental Management**, 2019.

LEWANDOWSKI, B., Relação entre características de bolha e parâmetros hidrodinâmicos para bolhas únicas na presença de agentes ativos de superfície, **Chem. Eng. ciência** **199**, 2019.

LIBÂNIO, M. **Fundamento de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas, São Paulo: Editora Átomo, 2010.

LING, F., WU, L., ZHANG, Y., YANG, X., WANG, H. Flotation characteristics of Cryptosporidium oocysts in coagulation effluent. **Water Research**, 2018.

LIU, J.; RAO, T.; CHEN, J.; WANG, Y. Effect of hydrostatic pressure on bubble-particle attachment in flotation. **Minerals Engineering**, 106, 2017.

LIU, J.; RAO, T.; CHEN, J.; WANG, Y. The effect of pressure on flotation kinetics of copper sulfide minerals. **Minerals Engineering**, 131, 2019.

LIU, J.; RAO, T.; WANG, Y.; CHEN, J.; CAO, Y. Effect of pressure on the flotation and separation of copper–molybdenum sulfides. **Minerals Engineering**, 137, 2019.

LIU, J.; RAO, T.; WANG, Y.; CHEN, J.; CAO, Y. The effect of increased pressure on flotation separation of fluorite from calcite using sodium oleate as a collector. **Minerals Engineering**, 116, 2018.

LIU, X.; WANG, Y.; WANG, Z. The impact of PolyDADMAC molecular weight on particle aggregation and floc properties. **Separation and Purification Technology**, 270, 2021.

LU Q.; HE D.; PANG Y.; ZHANG Y.; HE C.; WANG Y.; ZHANG H.; SHI Q; SUN Y. Processing of dissolved organic matter from surface waters to sediment pore waters in a temperate coastal wetland. **Science of the Total Environment**, 2020.

LUSTOSA, J. B. *et al.* Tratamento e aproveitamento de água de lavagem de filtro em estação de tratamento de água. **Revista DAE**, v. 65, n. 206, p. 44–61, 1 maio 2017.

MARQUES, M. Resistência específica do lodo: o que é e como avaliar. **Revista Água & Ambiente**, São Paulo, n. 68, p. 46-48, 2011.

MARTINS, Gilberto de Andrade; DOMINGUES, Osmar. **Estatística Geral e Aplicada**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

MEGID, M. H. A.; AMER, A. A. R.; ELSAYED, K. H. Coagulation and Dissolved Air Flotation for Treatment of Oil-Water Emulsion. **Int. j. eng. sci.**, v. 3, n. 12, 2014.

MÉJEAN, A.; DALLE, K., PACI, G.; BOUCHONNET, S.; MANN, S., *et al.* Dihydroanatoxin-a Is Biosynthesized from Proline in *Cylindrospermum stagnale* PCC 7417: Isotopic Incorporation Experiments and Mass Spectrometry Analysis. **Journal of Natural Products**. American Chemical Society and American Society of Pharmacognosy, 2016.

METCALF, L.; EDDY H. P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2017.

MOGHADDAM, S. S.; ALAVI MOGHADDAM, M. R.; ARAMI, M. Coagulation/flocculation process for dye removal using sludge from water treatment plant: Optimization through response surface methodology. **Journal of Hazardous Materials**, v. 175, p. 651-657, 2010.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Investigação da coagulação e floculação adequadas para a FAD no tratamento de água com cor aparente moderada e baixa turbidez destinada ao abastecimento público. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 8, n. 11, 2008.

MY HAN; MK KIM; MS SHIN. Geração de um bolha carregada positivamente e seu possível mecanismo de formação, J. Abastecimento de Água Res. **Tecnol. AQUA**, 2006.

OLIVEIRA, R. P.; NEVES, R. C.; FERREIRA, T. F.; SILVA, T. M.; CARDOSO, M. B. Performance evaluation of a horizontal flow flocculator for drinking water treatment. **Journal of Water Process Engineering**, 2016.

OYEGBILEA, B.; AY, P.; NARRAA, S. Optimization of physicochemical process for pre-treatment of fine suspension by flocculation prior to dewatering. **Desalination and Water Treatment**. v. 57, p. 2726-2736, 2016.

PAIVA, M. W.; PARREIRA, R. L. T. Resíduos das estações de tratamento de água (ETA). **Linguagem Acadêmica**, Batatais, v. 2, n. 2, p. 83-86, jul/dez. 2012.

PAMPLONA, P. M. P.; MELO, J. C. T. F.; FARIAS, A. M. O. Integração de Tecnologias para o Tratamento de Lodo de ETA: Estudo de Caso em Uma Estação de Tratamento de Água. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 3, 2018.

PARK, K. H.; PARK, J. H.; LEE, C. H.; LEE, J. H. Treatment of oily wastewater using a serpentine flotation system. **Environmental Technology**, 2012.

PATRIZZI, L. J.; REALI, M. A. P.; MORUZZI, R. B. Water color and iron removal: comparison of flotation and sedimentation techniques. *In*: MOHAN, R. M. (ed.). **Research Advances in Water Research**. 5. Kerala: Global Research Network Publ., 2004

PEASE, J.D.; CURRY, D.C.; YOUNG, M.F. Designing flotation circuits for high fines

recovery, **Minerals Engineering**, v.19, 2006.

PORRAS, A. C. **Uso de lodo de estação de tratamento de água e agregado reciclado miúdo na fabricação de elementos de alvenaria**. 2007. 213 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, 2007.

RAHMAWATI, A. S., SUNARSO, J. Flotation characteristics of microorganisms: a review. *Journal of Water Process Engineering*, 2019.

RAMIREZ, K. G.; POSSAN, E.; DEZEN, B. G.; COLOMBO, M. Potential uses of waste sludge in concrete production, **Management of Environmental Quality**, v. 28 n. 6, 2017.

RAO, N. R. H.; GRANVILLE, A. M.; BROWNE, C. I.; DAGASTINE, R. R.; YAP, R.; JEFFERSON, B.; HENDERSON, R. K. Determining how polymer-bubble interactions impact algal separation using the novel ‘Posi’-dissolved air flotation process. **Separation and Purification Technology**, 2018.

RAO, N. R. H.; YAP, R.; WHITTAKER, M.; STUETZ, R. M.; JEFFERSON, B.; PEIRSON, W. L.; GRANVILLE, A. M.; HENDERSON, R. K. The role of algal organic matter in the separation of algae and cyanobacteria using the novel ‘Posi’-dissolved air flotation process. **Water Research** (Supplement C), 2018.

RAO, N.; GRANVILLE, A.; HENDERSON, R. Understanding variability in algal solid-liquid separation process outcomes by manipulating extracellular protein-carbohydrate interactions. **Water Research**, 2021.

REALI, M. A. P (org). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, p.250, 1999.

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

RICHTER, Carlos A. **Tratamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água**. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

RITA, K. Henderson; SIMON, A. Parsons; BRUCE, Jefferson. Polymers as bubble surface modifiers in the flotation of algae, **Environmental Technology**, 2010.

RUBIO, J.; SOUZA, M. L.; SMITH, R. W. Overview of Flotation as a Wastewater Treatment Technique. **Minerals Engineering**, n. 15, p. 139-155, 2002.

RUBIO, J.; TESSELE, F. Flotación Como Processo de Remoción de Contaminantes: Avances e Aplicaciones en la Flotación por Aire Dissuelto. **Minerales**, v. 57, n. 243, 2002

SAMPAIO, R.B., RIBEIRO, E.B., DANTAS, A.D. Estudo da desidratação de lodos de ETA por lodo adensado. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2021.

SANTOS, L. A. R.; MICHELAN, D. C. de G.; JESUS, T. M. Verificação da produção de lodo de ETA em função da quantidade e da qualidade da água bruta. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, São Paulo, v. 15, n. 2, 2021.

SCALIZE, P.; DI BERNARDO, L.; SOARES, L.; BAUMANN, L. Disposição de resíduo de

ETA em sistema de tratamento aeróbio de esgoto seguido de lagoa de sedimentação. **Revista DAE**, n. 197, p. 72-86, 2014.

SHER, F.; MALIK, A.; LIU, H.; Industrial Polymer Effluent Treatment by Chemical Coagulation and Flocculation. *J. Environ. Chem. Eng.* v. 1, 2013.

SHI, Y.; YANG, J.; MA, J.; LUO, C. Viabilidade de modificação da superfície da bolha para remoção de matéria orgânica da água do rio usando flotação por ar dissolvido. **Fronteiras da Ciência e Engenharia Ambiental**, 2017.

SHIH, Y. J., WEI, Y. L., LU, C. S. Flotation of Giardia cysts using dissolved air flotation. **Water Research**, 2007.

SOHN, B. Y.; KWON, S. B.; MIN, J. H.; KANG, J. W. Characteristics of pretreatment parameters and bubble size influencing DAF efficiency. **Separation Science and Technology**, 2009.

SOLEIMANI, M.; KAMYAB, M.; ESMAEILI, A. Polydadmac as a coagulant for textile wastewater treatment. **Journal of environmental chemical engineering**, 2018.

SOUZA, L. M.; SCALIZE, Paulo Sergio. Resistência específica do material sedimentado em ensaio de Jar Test, obtido com a adição de lodo de Estação de Tratamento de Água. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 29, p. 44-50, 2013.

SUKSIRIPATTANAPONG, C.; HORPIBULSUK, S.; BOONGRASAN, S.; UDOMCHAI, A.; CHINKULKIJNIWAT, A.; ARULRAJAH, A. Unit weight, strength and microstructure of a water treatment sludge–fly ash lightweight cellular geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 94, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.091>.

TEIXEIRA, M. R.; ROSA, M. J. Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa*. **Separation and Purification Technology**, 2006.

TEMESGEN, T., tecnologias de micro e nanobolhas como um novo horizonte para técnicas de tratamento de água: uma revisão, **Adv. Colloid Interface Sci.** 246, 2017.

UN, Yongjun *et al.* Effects of surfactants on the improvement of sludge dewaterability using cationic flocculants. **PloS one** v. 9,10 e111036, 27 Oct. 2014, Disponível em: doi:10.1371/journal.pone.0111036. Acesso em: 20 jun. 2021.

VAN HAANDEL, ADRIANUS CORNELIUS; ALEM SOBRINHO, PEDRO. Produção, composição e Constituição de lodo de esgoto. *In*: ANDREOLI, Cleverson Vitorio (coord.). **Alternativas de Uso de resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. cap 2. p. 7-28.

VERRELLI, D. I.; COLLINS, K. E. Coagulantes: escolhendo o melhor para cada aplicação. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 643-650, 2008.

VIANNA, Marcos. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 6. ed. Belo Horizonte: 3i Editora, 2019. v. 1.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. v. I.

KRACHT, W.; FINCH, J. A. Bubble break-up and the role of frother and salt. **International Journal of Mineral Processing**, v. 92, Issues 3-4, p. 153-161, 2009.

WANG, G.; NGUYEN, AV.; MITRA, S. Uma revisão dos mecanismos e modelos de destacamento bolha-partícula na flotação de espuma. Set. **Purif. Tecnol.** 2016.

WENG, L.; TEMMINGHOFF, E. J.; VAN RIEMSDIJK, W. H. Aluminum speciation in natural waters: measurement using Donnan membrane technique and modeling using NICA-Donnan. **Water Research**, p. 4215-4226, 2002.

WU, CC; WU, JJ. Effect of charge neutralization on the dewatering performance of alum sludge by polymer conditioning. **Water Science and Technology**, v. 44, n. 10, p. 315-319. PMID: 11794672, 2001.

YOVANOVIC, A. P. **Engenharia da Concentração de Massa por Flotação: Fundamentos da Flotação**. Belo Horizonte: Ciminelli e Salum (Eds.), 2004. v. 1

YUSOFF, M. A.; KHAN, M. R.; CHUA, Q. S.; IWATA, M.; HASSAN, M. A. Performance evaluation of serpentine flotation system for treatment of palm oil mill effluent. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2014.

ZHAO, H.; WANG, Y.; ZHANG, X.; LI, J. Optimization of process parameters for improving the performance of a flocculation tank in a water treatment plant using response surface methodology. **Journal of Cleaner Production**, 2017.

ZHAO, Y. Q.; PAPAVALOPOULOS, E. N.; BACHE, D. H.; MACKINNON, P. A. **Polymer**, 2002