



UNIVERSIDADE DE RIBEIRÃO PRETO
Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PILOTO DE DESAGUAMENTO DE LODO
DE ETA UTILIZANDO MANTA GEOTÊXTIL

THIAGO DE LOIOLA ARAÚJO E SILVA

RIBEIRÃO PRETO

2024

THIAGO DE LOIOLA ARAÚJO E SILVA

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PILOTO DE DESAGUAMENTO DE LODO
DE ETA UTILIZANDO MANTA GEOTÊXTIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências
Exatas Naturais e Tecnologias da Universidade de
Ribeirão Preto, como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Doutor em Tecnologia
Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marília Vasconcellos
Agnesini

RIBEIRÃO PRETO

2024

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Processamento
Técnico da Biblioteca Central da UNAERP

- Universidade de Ribeirão Preto -

S586a

SILVA, Thiago de Loiola Araújo e, 1983-

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PILOTO DE
DESAGUAMENTO DE LODO DE ETA UTILIZANDO MANTA
GEOTÊXTIL / Thiago de Loiola Araújo e Silva. - Ribeirão Preto, 2024.
218 f. : il. color.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Marília Vasconcellos Agnesini.

Tese (Doutorado) - Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP,
Tecnologia Ambiental, 2024.

1. Resíduo de ETA. 2. Polímero. 3. Adensamento. 4. Desaguamento.
5. Bidim. II. Título.

CDD 628

THIAGO DE LOIOLA ARAÚJO E SILVA

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PILOTO DE DESAGUAMENTO DE LODO
DE ETA UTILIZANDO MANTA GEOTÊXTIL**

Tese de Doutorado apresentada ao
programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Ambiental do Centro de
Ciências Exatas, Naturais e
Tecnologias da Universidade de
Ribeirão Preto, para a obtenção do
título de Doutor em Tecnologia
Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental

Data de defesa: 03 de dezembro de 2024.

Resultado: **APROVADO**

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Marília
Vasconcellos Agnesini
Presidente/UNAERP



Documento assinado digitalmente
SERGIO CARLOS BERNARDO QUEIROZ
Data: 24/01/2025 09:30:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sergio Carlos Bernardo
Queiroz
UFT

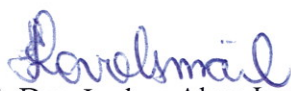


Documento assinado digitalmente
GIULLIANO GUIMARAES SILVA
Data: 24/01/2025 15:34:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

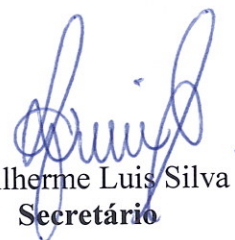
Prof. Dr. Giulliano Guimarães
Silva
IFTO



Prof. Dra. Cristina Filomena P
Rosa Paschoalato
UNAERP



Prof. Dra. Isadora Alves Lovo Ismail
UNAERP



Guilherme Luis Silva
Secretário

**RIBEIRÃO PRETO
2024**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, aos meus pais Inácio de Loiola (*in memoriam*) e Maria das Medalhas Carvalho Araújo e Silva pelo exemplo através do estudo, à minha querida esposa Lígia Dantas e aos nossos filhos André Luiz, Davi Dantas e Vivian Dantas por todo amor e dedicação.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela saúde, força, sabedoria e inteligência para concretização deste e de todos os projetos da minha vida. Sem Ele nada poderia e nem pode ser concretizado.

À Ligia, minha esposa e companheira de vida, meu porto seguro por ter me escutado, me acalmado e aconselhado em todos os momentos.

Aos meus filhos André Luiz, Davi e Vivian que mesmo tão pequenos me deram força através do amor e da companhia.

À minha mãe, Maria das Medalhas pelas orações, carinho, conselhos, compreensão e exemplo de vitória através do estudo. E ao meu pai Inácio de Loiola que mesmo não estando mais presente, sempre está em meus pensamentos.

Às minhas irmãs Thaynara e Thailane que sempre torceram por mim e me apoiaram. E minhas queridas sobrinha Maria Cecília e Maria Luísa pelas ligações descontraídas e momentos de alegria.

À minha orientadora, professora Marília Vasconcellos Agnesini pelas palavras de incentivo, confiança e por me orientar indicando as condições adequadas de realização desta Tese.

À professora Cristina Filomena Pereira Rosa Paschoalato que participou da idealização deste trabalho e por realizar as análises de água no laboratório de Recursos Hídricos na UNAERP.

Ao Drº Gustavo Frata por idealizar o início deste trabalho, apontando os materiais a serem usados na Tese.

À professora Luciana Rezende Alves de Oliveira, coordenadora do curso de Doutorado em Tecnologia Ambiental à época do início da minha caminhada na UNAERP e fundamental para o processo de Doutorado Sanduíche.

Ao professor Murilo Daniel de Mello Innocentini, coordenador do curso pelo suporte e ajuda ao longo desta trajetória.

À professora Vera Homen por me receber e orientar na Faculdade de Engenharia do Porto, na Universidade do Porto, Portugal durante o período de doutorado sanduíche. Suas orientações foram fundamentais na minha formação acadêmica.

Aos colegas de FEUP Filipe, Ana Sofia e Fábio Bernardo pelos momentos e ensinamentos no LEPABE.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio e suporte na realização do doutorado sanduíche.

A todos os professores do curso de Doutorado em Tecnologia Ambiental da Universidade de Ribeirão Preto pelos conhecimentos passados.

Aos professores que compuseram a banca de qualificação e defesa de tese, professor Drº Sérgio Queiroz, professor Drº Giulliano Guimarães Silva, professora Drª Isadora Alves Lovo Ismail e professora Drª Cristina Filomena Pereira Rosa Paschoalato. As contribuições a este trabalho foram de fundamental importância para sua exitosa conclusão.

Um agradecimento especial ao colega Professor Drº Giulliano Guimarães Silva por me apresentar ao curso de Tecnologia Ambiental e à UNAERP.

À Prefeitura Municipal de Araguatins, através do Serviço Municipal de Saneamento por permitir o acesso à Estação de Tratamento de Água de Araguatins para a realização deste trabalho.

À minha sogra, que sempre defendeu o crescimento através da educação, muito obrigado.

À Luciana e Sterlan pela ajuda e os momentos de descontração.

Ao casal de amigos Moisés e Keline pelas palavras de incentivo, companhia e amizade.

Ao amigo Ancelmo pelos momentos de alegria e conversas descontraídas ao longo da realização deste trabalho.

À gestão do IFTO Campus Araguatins por todo apoio que concedeu na pesquisa do Doutorado em especial os diretores do Campus Palmas Prof. Josafá Carvalho e Prof. Claudio de Sousa Galvão. Muito obrigado pela credibilidade e todo o esforço da instituição em ajudar nas atividades da pesquisa.

À Valeria Cristina Ferreira, Armando Veras Trovão e Dona Rita pelo suporte, ajuda e incentivo nas realizações dos ensaios no laboratório de química e bioquímica do IFTO – Campus Araguatins.

Às alunas Alícia Silva Gomes Vieira, Laís Lima Pimentel da Silva e Verônica Alves de Carvalho pelo auxílio na realização dos experimentos no laboratório de química e bioquímica do IFTO – Campus Araguatins.

Mais uma vez agradeço a Deus e a todos os amigos e familiares que dividiram esses 4 anos comigo e me apoiaram através de palavras e atos me ajudando de forma direta ou indireta na realização deste curso. Meu muito obrigado!

**“Tudo o que podemos decidir é o que
fazer com o tempo que nos é dado.”**

J R R. Tolkien, o Senhor dos Anéis

RESUMO

Em estações de tratamento de água (ETA), durante os processos de operações para o tratamento deste recurso, existe a geração de resíduos sólidos denominados de lodo ou também de resíduos de RETA's. Estes, quando lançados de forma irregular ou sem tratamento nos corpos hídricos, geram impactos ambientais significativos. Portanto, a busca por soluções que sejam economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis para o tratamento deste resíduo é fundamental para a conservação dos recursos hídricos. Neste sentido, o uso de tecidos geotêxteis pode ser uma forma viável, de baixo custo, fácil implantação e manutenção para o desaguamento do lodo de ETA. Assim, este trabalho objetivou montar e operar uma unidade piloto para o desaguamento de lodo para ETA's com a filtração em tecido geotêxtil – bidim. O estudo envolveu duas diferentes concentrações de lodo, coletadas no decantador da ETA municipal, em estações diferentes do ano, com concentrações de 15,20 g/L SST e 22,03 g/L SST. Foram realizados ensaios de adensamento e desaguamento em bancada onde nos primeiros, objetivou-se determinar a melhor dosagem do condicionante químico aniônico, catiônico e não iônico. Já os ensaios de desaguamento tiveram por objetivo descobrir a condição experimental adequada a ser extrapolado para uso nos ensaios de desaguamento na estação piloto. Como resultado, a escolha do polímero se deu pelo menor valor calculado do índice volumétrico de lodo (IVL), sendo para o lodo com a concentração de 15,20 g/L SST foi um valor de 14,60 mL/g usando o polímero aniônico; já o lodo de concentração 22,03 g/L SST apresentou, como menor IVL, 25,64 mL/g com o uso do polímero não iônico. Nos ensaios na estação piloto, foram realizados seis ensaios de desaguamento, três para cada uma das amostras de lodo. Em todos os ensaios, houve remoção da turbidez acima de 86%, com resultados acima de 94% para o lodo de 15,20 g/L SST. As taxas de filtração foram maiores para o desaguamento com resíduo de concentração 22,03 g/L SST, ainda com o primeiro ensaio com a manta geotêxtil. No primeiro uso da manta também com o lodo 15,20 g/L SST houve a maior taxa de filtração com essa amostra, mas menor do que a outra. O percentual de desaguamento ficou acima de 88% nas duas amostras e a eficiência de filtração atingiu valores mais elevados com a amostra de lodo de 22,03 g/L SST – atingindo em todos os ensaios acima de 99%. Uma hipótese a ser analisada é a influência do polímero não iônico nesta amostra, desta forma impactando o valor da eficiência de filtração. Quanto ao teor de sólidos, este variou na amostra 15,20 g/L SST de 10,45% a 12,70% e na amostra 22,03 de 18,40% a 19,96%. Os ensaios de desaguamento na estação piloto apresentaram os seguintes resultados: para a amostra de lodo 15,20 g/L SST, a eficiência de filtração foi de 98%, a remoção de turbidez em 91,48%, a taxa de filtração em $0,2055 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ e o percentual de desaguamento 90,15%; já o lodo de concentração 22,03 g/L SST apresentou uma eficiência de filtração de 99,99%, a remoção de turbidez atingiu 88,97%, uma taxa de filtração de $0,2009 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, e percentual de desaguamento em 94,48%. Dessa forma, a estação piloto se mostrou viável como unidade de tratamento de resíduo de ETA, sendo, graças ao seu baixo custo de instalação e manutenção, atrativa para municípios pequenos que não dispõem de tecnologias de alto custo ou recursos técnicos e financeiros para a realização do tratamento adequado dos resíduos gerados em ETA.

Palavras-chave: Resíduo de ETA; Polímero; Adensamento; Desaguamento; Bidim.

ABSTRACT

In water treatment plants (WTP), during the operating processes for the treatment of this resource, there is the generation of solid waste called sludge or also waste from WTPs. These, when released irregularly or without treatment into water bodies, generate significant environmental impacts. Therefore, the search for solutions that are economically viable and environmentally sustainable for the treatment of this waste is essential for the conservation of water resources. In this sense, the use of geotextile fabrics can be a viable, low-cost, easy-to-implement and easy-to-maintain way to dewater sludge from WTPs. Thus, this study aimed to assemble and operate a pilot unit for the dewatering of sludge for WTPs with filtration in geotextile fabric - bidim. The study involved two different concentrations of sludge, collected in the decanter of the municipal WTP, in different seasons of the year, with concentrations of 15.20 g/L SST and 22.03 g/L SST. Bench consolidation and dewatering tests were carried out. In the first, the objective was to determine the best dosage of the anionic, cationic and non-ionic chemical conditioner. The dewatering test aimed to discover the appropriate volume to be extrapolated for use in dewatering tests at the pilot station. As a result, the polymer was chosen based on the lowest calculated value of the sludge volumetric index (SVI), for sludge with a concentration of 15.20 g/L SST was 14.60 mL/g using the anionic polymer; The sludge with a concentration of 22.03 g/L SST, presented the lowest IVL, 25.64 mL/g with the use of the non-ionic polymer. In the tests at the pilot station, 6 dewatering tests were carried out, 3 for each of the sludge samples. In all tests, there was turbidity removal above 86%, with results above 94% for the 15.20 g/L SST sludge. Filtration rates were higher for dewatering with residue concentration of 22.03 g/L SST, even with the first test with the geotextile blanket. In the first use of the blanket, also with 15.20 g/L SST sludge, there was the highest filtration rate with this sample, but lower than the other. The dewatering percentage was above 88% in both samples and the filtration efficiency reached higher values with the sludge sample of 22.03 g/L SST – reaching above 99% in all tests. One hypothesis to be analyzed is the influence of the non-ionic polymer in this sample, thus impacting the filtration efficiency value. As for the solids content, it varied in sample 15.20 g/L SST from 10.45% to 12.70% and in sample 22.03 from 18.40% to 19.96%. The dewatering tests at the pilot station showed the following results: for the 15.20 g/L TSS sludge sample, the filtration efficiency was 98%, the turbidity removal was 91.48%, the filtration rate was $0.2055 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ and the dewatering percentage 90.15%. The sludge with a concentration of 22.03 g/L TSS presented a filtration efficiency of 99.99%, turbidity removal reached 88.97%, a filtration rate of $0.2009 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, and a percentage of dewatering at 94.48%. In this way, the pilot station proved to be viable as an WTP waste treatment unit, being, thanks to its low installation and maintenance cost, attractive for small municipalities that do not have high-cost technologies or technical and financial resources to carry out adequate treatment of waste generated in WTP's.

Keywords: WTP waste; Polymer; Densification; Dewatering; Bidim.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Interação entre meio ambiente, Comunidade e Tecnologias de Tratamento.....	30
Figura 2 Principais tecnologias empregadas no tratamento de água no Brasil	34
Figura 3 Decantador regular de fluxo horizontal.....	38
Figura 4 Unidades da ETA que são geradoras de resíduos.....	42
Figura 5 Possibilidades de tratamento de resíduos de ETA de ciclo completo	47
Figura 6 Tecnologias de desaguamento utilizando sistemas mecanizados.....	49
Figura 7 Tecnologias de desaguamento utilizando sistemas naturais.....	50
Figura 8 Bag para desaguamento do lodo e lodo desidratado em bag	53
Figura 9 Cegamento em geotêxtil.....	54
Figura 10 Colmatação.....	55
Figura 12 Etapas da pesquisa.....	58
Figura 15 Vista área da ETA de Araguatins e do ponto de coleta de água	61
Figura 13 Procedimento de limpeza do decantador.....	62
Figura 14 Decantador onde foram realizadas as coletas do resíduo.....	63
Figura 15 Reservatório e resíduo base coletado	63
Figura 16 Proveta graduada.....	65
Figura 18 Agitação para abertura de polímero	66
Figura 18 Sistema de filtração em manta geotêxtil de bancada	68
Figura 19 Representação da avaliação do ensaio de desaguamento em bancada.....	70
Figura 20 Amostra do Bidim® GT07 usado na pesquisa.....	71
Figura 21 Projeto da estação piloto	72
Figura 22 Estação piloto instalada na ETA municipal de Araguatins - TO	73
Figura 23 Reservatórios de resíduo base (A) e recipientes principal e de filtração (B).....	74
Figura 24 Parte interna do reservatório de desaguamento.....	75
Figura 27 Agitação do lodo	75
Figura 26 Localização do município de Araguatins - TO.....	80
Figura 29 Corpos hídricos no município de Araguatins - TO	80
Figura 28 Bacia do Rio Taquari e microbacias.....	81
Figura 29 Área de Proteção Ambiental do Rio Taquari - APA Taquari	82
Figura 30 Temperatura média por mês no município de Araguatins - TO no ano de 2023.....	84
Figura 31 Índice pluviométrico por mês no município de Araguatins - TO no ano de 2023 ..	85
Figura 32 Bomba de sucção da água bruta	86

Figura 33 Imagem aérea da ETA de Araguatins	87
Figura 34 Casa de química	87
Figura 35 Estação elevatória de água tratada no SAA de Araguatins	88
Figura 36 Floculador da ETA	89
Figura 37 Decantadores da ETA.....	90
Figura 38 Filtros da ETA	91
Figura 39 Reservatório Elevado 01	93
Figura 40 Centro de armazenamento e distribuição 2	94
Figura 41 Ensaio de adensamento do lodo de concentração 15,20 g/L SST: (a) Polímero não iônico, (b) aniônico e (c) catiônico	98
Figura 42 Curvas de adensamento do lodo com concentração de 15,20 g/L SST com o uso do polímero aniônico	98
Figura 43 Curvas de adensamento do lodo com concentração de 15,20 g/L SST com o uso do polímero não iônico	99
Figura 44 Curvas de adensamento do lodo com concentração de 15,20 g/L SST com o uso do polímero catiônico	99
Figura 45 Melhores curvas de adensamento para o lodo de 15,20 g/L SST	100
Figura 46 Ensaio de adensamento em bancada do lodo de concentração 15,20 g/L SST: (a) Polímero não iônico, (b) aniônico e (c) catiônico	100
Figura 47 Resultados do IVL para os três polímeros em estudo, nas diferentes dosagens	103
Figura 48 Ensaio de adensamento do lodo de concentração 22,03 g/L SST: (a) Polímero não iônico, (b) aniônico e (c) catiônico	103
Figura 49 Curvas de adensamento do lodo com concentração de 22,03 g/L SST com o uso do polímero aniônico	104
Figura 50 Curvas de adensamento do lodo com concentração de 22,03 g/L SST com o uso do polímero não iônico	104
Figura 51 Curvas de adensamento do lodo com concentração de 22,03 g/L SST com o uso do polímero catiônico	105
Figura 52 Melhores curvas de adensamento para o lodo de 22,03 g/L SST	105
Figura 53 Sobrenadante dos testes de adensamento referentes ao lodo 22,03 g/L SST	107
Figura 54 Resultados do IVL para os três polímeros em estudo	108
Figura 55 Média dos volumes desaguados no ensaio de bancada com a amostra de lodo 15,20 g/L SST	110

Figura 56 Média dos volumes desaguados no ensaio de bancada com a amostra de lodo 22,03 g/L SST	111
Figura 57 Volume desaguado durante o ensaio de adensamento com o volume de 300 mL alternado e em batelada com o lodo de 15,20 g/L SST	115
Figura 58 Volume desaguado durante o ensaio de adensamento com o volume de 300 mL alternado e em batelada com o lodo de 22,03 g/L SST	115
Figura 59 Taxa de filtração obtida durante o ensaio de adensamento com o volume de 300 mL alternado e em batelada com o lodo de 15,20 g/L SST	116
Figura 60 Taxa de filtração obtida durante o ensaio de adensamento com o volume de 300 mL alternado e em batelada com o lodo de 22,03 g/L SST	116
Figura 61 Filter cake e régua no reservatório de desaguamento	119
Figura 62 Altura inicial e altura final do ensaio de desaguamento - concentração 15,20 g/L SST	120
Figura 63 Turbidez do filtrado nas rodadas na estação piloto - lodo concentração 15,20 g/L SST	124
Figura 64 Turbidez do filtrado nas rodadas na estação piloto - lodo concentração 22,03 g/L SST	127
Figura 65 Taxa de filtração das amostras de lodo.....	129
Figura 66 Filter cake formado no ensaio na estação piloto	134

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 História do saneamento básico no Brasil.....	20
Quadro 2 Etapas do sistema de abastecimento de água.....	31
Quadro 3 Classificação das estações de tratamento de água	32
Quadro 4 Classificação dos decantadores	37
Quadro 5 Parâmetros observados na escolha do material filtrante.....	39
Quadro 6 Impactos ambientais gerados a partir do lançamento indiscriminado do lodo em corpos hídricos.....	40
Quadro 7 Parâmetros de monitoramento em filtros e decantadores para monitoramento da produção de resíduos	44
Quadro 8 Vantagens e desvantagens dos sistemas mecanizados de secagem	49
Quadro 9 Vantagens e desvantagens dos sistemas naturais de secagem	50
Quadro 10 Propriedades e funções dos geotêxteis	57
Quadro 11 Características do Geotêxtil Bidim® GT 07.....	71
Quadro 12 Parâmetros de análise do filtrado após o processo de desaguamento.....	76
Quadro 13 Características do Rio Taquari.....	81
Quadro 14 Unidades da ETA de Araguatins	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Abastecimento de água nas regiões do Brasil	22
Tabela 2 Esgotamento sanitário	23
Tabela 3 Manejo de resíduos sólidos urbanos	23
Tabela 4 Drenagem e manejo de águas pluviais	24
Tabela 5 Quantidade de água disponível por autor	28
Tabela 6 Teor de sólidos do resíduo antes e após o processo de desaguamento	51
Tabela 7 Equipamentos utilizados na pesquisa	59
Tabela 8 Parâmetros, métodos, unidade e limite de detecção	59
Tabela 9 Produtos químicos utilizados na pesquisa	60
Tabela 10 Polímeros e concentrações usados nos ensaios de adensamento	65
Tabela 11 Faixa de valores do IVL	67
Tabela 12 Ensaios realizados na estação piloto	73
Tabela 13 Dados Técnicos do equipamento "Medidor de Umidade ID200"	78
Tabela 14 Aspectos socioeconômicos do Município de Araguatins - TO	83
Tabela 15 Características da bomba de sucção da ETA de Araguatins	86
Tabela 16 Estações elevatórias da ETA de Araguatins	88
Tabela 17 Adutoras da ETA de Araguatins	91
Tabela 18 Reservatórios de água tratada de Araguatins - TO	92
Tabela 19 Rede de distribuição da cidade de Araguatins	94
Tabela 20 Número de ligações de água em Araguatins de 2016 a 2021	95
Tabela 21 Parâmetros de caracterização da água bruta	95
Tabela 22 Parâmetros de caracterização físico-química do lodo amostra período seco e chuvoso	96
Tabela 23 Valores de DQO (mg/L) para lodo de ETA preconizados por autores	97
Tabela 24 Características do sobrenadante nos ensaios de adensamento do lodo de 15,20 g/L SST	101
Tabela 25 Características do sobrenadante nos ensaios de adensamento do lodo de 22,03 g/L SST	106
Tabela 26 Resultados dos ensaios de adensamento em bancada com as duas concentrações de lodo e o branco	109
Tabela 27 Porcentagem e tempo de desaguamento dos volumes analisados para a amostra de 15,20 g/L SST	111

Tabela 28 Porcentagem e tempo de desaguamento dos volumes analisados para a amostra de 22,03 g/L SST	112
Tabela 29 Taxa de filtração, ao fim de cada ensaio de filtração das amostras de lodo analisados	113
Tabela 30 Valores de turbidez (uT) dos filtrados após cada ensaio de desaguamento	114
Tabela 31 Taxas de filtração nos ensaios de desaguamento com o volume de 300 mL alternado e em batelada	117
Tabela 32 Dados usados nos experimentos da estação piloto	118
Tabela 33 Turbidez, volume filtrado, tempo de desaguamento e H da filter cake do lodo de concentração 15,20 g/L SST – rodada 1	120
Tabela 34 Turbidez, volume filtrado, tempo de desaguamento e H decantada do lodo de concentração 15,20 g/L SST – rodada 2	121
Tabela 35 Turbidez, volume filtrado, tempo de desaguamento e H decantada do lodo de concentração 15,20 g/L SST – rodada 3	122
Tabela 36 Tempo de desaguamento, velocidade de sedimentação e turbidez na estação piloto amostra 15,20 g/L SST	123
Tabela 37 Turbidez, volume filtrado, tempo de desaguamento e H da filter cake do lodo de concentração 22,03 g/L SST – rodada 1	125
Tabela 38 Turbidez, volume filtrado, tempo de desaguamento e H da filter cake do lodo de concentração 22,03 g/L SST – rodada 2	126
Tabela 39 Turbidez, volume filtrado, tempo de desaguamento e H da filter cake do lodo de concentração 22,03 g/L SST – rodada 3	126
Tabela 40 Resumo dos parâmetros do filtrado – concentração 22,03 g/L SST	127
Tabela 41 Resultados da turbidez e da porcentagem de remoção no filtrado do lodo das duas concentrações de lodo.....	128
Tabela 42 Resultados das taxas de filtração em $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ das duas concentrações de lodo .	129
Tabela 43 Taxa de filtração e remoção da turbidez da amostra de lodo 15,20 g/L SST	130
Tabela 44 Parâmetros de análise do resíduo após o processo de desaguamento	131
Tabela 45 Eficiência de filtração na estação piloto	133

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAB	Adutora de água bruta
AAT	Adutoras de água tratada
$Al_2(SO_4)_3$	Sulfato de alumínio
$Al_2(SO_4)_3 \cdot FeSO_4$	Sulfato de alumínio ferroso
ANOVA	Análise de variância
APA	Área de Proteção Ambiental
APHA	American Public Health Association
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de Cálcio
CF	Constituição federal
cm	Centímetros
COT	Carbono orgânico total
DBO_5	Demanda bioquímica de oxigênio
DCFC	Delineamento Composto de Faces Centradas
DMAPU	Drenagem e manejo das águas pluviais
DQO	Demanda química de oxigênio
EF	Eficiência de filtração
EHI	Eventos hidrológicos impactantes
ETA	Estação de Tratamento de Água
FDA	Filtração direta ascendente
FDD	Filtração direta descendente
FiME	Filtração em Múltiplas Etapas
g	Gramas
g/L	Gramas por litro
g/L SST	Gramas por litro de sólidos suspensos totais
ha	Hectares
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFTO	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins
IVL	Índice volumétrico de lodo
km	Quilômetros
LCD	Liquid crystal display
m^2	Metros quadrados

m ³	Metros cúbicos
m ³ /dia	Metros cúbicos por dia
m ³ /h	Metros cúbicos por hora
m ³ .m ⁻² .d ⁻¹	Metros cúbicos por metro quadrado por dia
m ³ .m ⁻² .h ⁻¹	Metros cúbicos por metro quadrado por hora
mg pol./g SST	Miligrama de polímero por grama de sólido suspensos totais
mg/L	Miligramas por Litro
mg/L Al	Miligrama por litro de Alumínio
mg/L C	Miligrama por litro de carbono
mg/L Fe	Miligrama por litro de Ferro
ml	Mililitros
mn	Milímetros
NaClO	Hipoclorito de Sódio
°C	Graus Célsius
pH	Potencial hidrogeniônico
PLANASA	Plano Nacional de Saneamento Básico
PMSB	Planos Municipais de Saneamento Básico
PPP	Parceria público privada
PVC	Policloreto de Vinila
RAP	Reservatório apoiado
REL	Reservatório elevado
RETA	Resíduos de estação de tratamento de água
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SAA	Sistema de abastecimento de água
SAAE	Serviços Autônomos de Água e Esgoto
SANEAGO	Companhia de Saneamento de Goiás
SANEATINS	Companhia de Saneamento do Tocantins
SDT	Sólidos dissolvidos totais
SEMA	Secretaria Especial de Meio Ambiente
SEMUSA	Serviço Municipal de Saneamento Básico
SEPLAN	Secretaria de Planejamento do estado do Tocantins
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SST	Sólidos suspensos totais

ST	Sólidos totais
SUS	Sistema Único de Saúde
UNAERP	Universidade de Ribeirão Preto
uT	Unidade de turbidez

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 PANORAMA DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL	18
3.1.1 Abastecimento de Água	22
3.1.2 Esgotamento Sanitário	22
3.1.3 Manejo de Resíduos Sólidos	23
3.1.4 Drenagem e Manejo das Águas Pluviais (DMAPU)	24
3.1.5 Legislação do Saneamento Básico	25
3.2 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO.....	26
3.2.1 Tratamento em Ciclo Completo.....	35
3.3 RESÍDUOS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	39
3.4 TECNOLOGIAS PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS GERADOS EM ETA'S	43
3.4.1 Idealização dos Sistemas de Tratamento dos Resíduos de ETA.....	45
3.4.2 Desaguamento de Resíduo de ETA	48
3.5 MATERIAIS GEOTEXTEIS	51
3.8.1 Mecanismos de Filtração em Geossintéticos.....	55
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	58
4.1 EQUIPAMENTOS, MÉTODOS E PRODUTOS QUÍMICOS	58
4.2 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	60
4.2.1 Caracterização do Manancial que abastece a ETA de Araguatins	60
4.2 ETAPA II: CARACTERIZAÇÃO DO LODO	62

4.2.4 Caracterização dos Resíduos da ETA de Araguatins	63
4.3 ETAPA II: ENSAIOS DE BANCADA	64
4.3.1 Ensaios de Adensamento por Gravidade do Lodo de ETA	65
4.3.2 Montagem do Sistema de Desaguamento em Manta Geotêxtil em Bancada	68
4.4.3 Operação da Unidade Piloto para Desaguamento do Lodo de ETA.....	74
4.4.4 Avaliação do Desaguamento do Lodo na Estação Piloto	76
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO.....	79
5.1.1 Sistema de Abastecimento de Água do Município de Araguatins- TO	85
5.1.2 Caracterização do Manancial e do Lodo	95
5.2 ENSAIOS DE ADENSAMENTO DO LODO EM BANCADA	97
5.2.1 Ensaios de Adensamento com Lodo de Concentração 15,20 g/L SST.....	97
5.2.2 Ensaios de adensamento com lodo de concentração 22,03 g/L SST.....	103
5.2.3 Avaliação dos Ensaios de adensamento do lodo.....	108
5.3 ENSAIOS DE DESAGUAMENTO DO LODO EM BANCADA	109
5.4 ENSAIOS NA ESTAÇÃO PILOTO	117
5.4.1 Determinação do Volume Usado nos Experimentos da Estação Piloto.....	117
5.4.2 Ensaios de Desaguamento na Estação Piloto com Lodo 15,20 g/L SST.....	118
5.4.3 Ensaios de Desaguamento na Estação Piloto com Lodo de Concentração 22,03 g/L SST.....	124
5.4.4 Taxas de Filtração e Porcentagem de Sólidos das Amostras de Lodo	128
5.4.5 Teor de Sólidos Retidos na Manta Geotêxtil e Percentual de Desaguamento	131
5.4.6 Eficiência de Filtração	132
6. CONCLUSÃO.....	135
7. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	137
REFERÊNCIAS	138
APÊNDICE A.....	146

APÊNDICE B.....	187
APÊNDICE C	194
APÊNDICE D	203
ANEXO A	205

1 INTRODUÇÃO

Além do caráter social e de saúde pública do saneamento básico, é inegável que o desenvolvimento econômico de um país é diretamente afetado pela presença ou ausência deste serviço. De forma mais enfática, a qualidade e quantidade do saneamento básico impacta diretamente o quanto e como uma cidade, estado ou país atinge seu desenvolvimento.

Assim como no Brasil, onde conhecidamente a prestação dos serviços de saneamento básico não atende grande parte da população, o estado do Tocantins reflete a realidade já observada em outras regiões do país – 79,44 % da população estadual é atendida pelo abastecimento de água, enquanto 30,22% possuem atendimento total ao serviço de esgoto (SNIS, 2022).

Em todas as regiões do estado, o registro de casos de doenças de veiculação hídrica é comum, principalmente em municípios mais afastados dos grandes centros e comunidades rurais ou tradicionais, como quilombolas e indígenas. Também é possível perceber o grande número de lixões, aterros controlados e locais onde o fornecimento de água ainda não atinge toda a população, gerando a dependência de outras fontes como açudes e poços artesianos.

Em Araguatins - TO, a realidade é a mesma observada nos outros municípios do estado do Tocantins, segundo o Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento, (SNIS) - 68% da população da zona urbana possui abastecimento de água tratada; não existe tratamento de esgoto, a drenagem urbana é inexistente e a coleta de resíduos sólidos é realizada apenas na região central da cidade e tem o lixão público municipal como destinação final.

Com um IDH de 0,631 (IBGE, 2010) e uma renda *per capita* de R\$ 14.472,16, o município é considerado de baixa renda, onde a maior parte da população é assistida por programas sociais e quaisquer aumentos no valor dos serviços básicos ofertados, já causa um impacto à renda familiar. Portanto, o serviço de saneamento básico oferecido deve atender a demanda de qualidade sem comprometer a renda familiar. Neste ponto, a inovação na oferta do serviço através da pesquisa com novos métodos e tecnologias mais baratos deve nortear a melhoria no atendimento e promover a ampliação do saneamento básico no município de Araguatins – TO.

Neste ponto, cabe avaliar como o Brasil trata seus recursos hídricos, visto que ainda existe a necessidade de uma proteção mais efetiva dos mananciais e corpos d'água,

principalmente quanto a emissão de esgoto *in natura*, detritos industriais, conservação da mata ciliar, erosão e assoreamento e desperdício de água – um tema que merece destaque, haja visto o cenário de escassez hídrica vivenciado já em muitas regiões do país.

Desta forma, é notável o desafio a ser vencido para se atingir a segurança sanitária para o fornecimento de água potável para a população, uma vez que os mananciais estão se apresentando cada vez mais impactados ou senão, apresentam quantidades mínimas de água para sua captação – impactos ambientais gerados, em sua maioria, a partir de atividades antrópicas.

Posto isto, para que haja a remoção dos contaminantes e outros produtos dos mananciais, tornando a água potável para a população, esta deve ser submetida a vários processos e operações de tratamento, constituindo, assim, uma Estação de Tratamento de Água (ETA). Durante a execução das operações para o tratamento da água existe a produção de um resíduo sólido, também chamado de lodo de ETA. Esse resíduo é um material inerte que ao ser despejado *in natura* nos rios é um agente causador de impactos ambientais significativos no meio ambiente.

O tratamento do lodo de ETA envolve o processo de separação da parte sólida da parte líquida através da sedimentação (adensamento) e desaguamento. Este se trata de uma operação que, a partir do resíduo adensado, aumenta-se o teor de sólidos suspensos totais (SST), reduzindo o volume do lodo a ser disposto. As tecnologias de tratamento mais utilizadas neste processo são divididas em sistemas mecanizados (centrífuga, filtro prensa de esteira e/ou de placas), sistemas naturais (lagoa de lodo ou de resíduos), sistema por filtração (leito de secagem, leito de drenagem) e o sistema em tecido especial (geotêxtil).

Isto posto, a contribuição científica deste trabalho é verificar o desempenho do tecido geotêxtil (bidim) durante o processo de desaguamento para o tratamento de resíduos sólidos (lodo) gerados a partir do tratamento de água em uma ETA de ciclo completo. Segundo Almeida *et al.* (2001) o bidim leva vantagem frente a outras mantas geotêxteis nos aspectos econômicos, na facilidade de transporte, acesso, manuseio e mão-de-obra. Para isso, foi construída e operada uma instalação piloto tendo o tecido geotêxtil (bidim) como meio filtrante para o resíduo gerado.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa teve como objetivo geral avaliar o desempenho do processo de desaguamento do lodo de estação de tratamento de água em manta geotêxtil bidim em uma unidade piloto, considerando variações no teor de sólidos suspensos totais do resíduo e condicionante químico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ✓ Caracterizar o sistema de abastecimento de água (SAA) da cidade de Araguatins – Tocantins;
- ✓ Caracterizar o lodo gerado na unidade de decantação da ETA da cidade de Araguatins – TO;
- ✓ Realizar ensaios de adensamento do lodo por gravidade em bancada;
- ✓ Realizar ensaios de desaguamento em manta geotêxtil bidim em escala de bancada;
- ✓ Montar e operar uma estação piloto de desaguamento em manta geotêxtil, localizado na Estação de Tratamento de Água de Araguatins - TO;
- ✓ Verificar a correlação dos sólidos suspensos totais no resíduo filtrado nos ensaios de bancada e na estação piloto.
- ✓ Caracterizar o resíduo retido na manta geotêxtil e o efluente após o processo de desaguamento na estação piloto.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A preocupação as questões ambientais se tornaram a baliza das políticas públicas dos países do mundo e preocupação também da iniciativa privada. Os recorrentes impactos ambientais gerados pelas alterações climáticas previstas e imprevistas assustam os governos do mundo inteiro, gerando prejuízos na casa dos bilhões de dólares e perdas humanas, naturais e materiais irrecuperáveis.

Os danos gerados atingem todas as áreas da sociedade, necessitando de profissionais multidisciplinares para lidar com toda uma gama de alterações e adaptações atuais e futuras. Neste aspecto, a iniciativa privada já se prepara para uma conscientização do mercado, voltado para uma produção sustentável em toda a sua cadeia produtiva, desde a captação da matéria – prima, passando pela geração de resíduos e uso dos recursos naturais como a água.

Neste aspecto, não citando apenas a água, mas toda uma cadeia de recursos naturais que deve ser administrada para que os impactos gerados pelo seu uso seja o máximo mitigado. Para isso, devem obedecer a normas e comportamentos que permitam o uso racional e sustentável. Portanto, as ações e estruturas do saneamento básico são essenciais para que se atinjam o objetivo da mitigação ou eliminação dos impactos ambientais.

No universo do saneamento, as ações de engenharia, que por muito tempo se voltaram para a construção da infraestrutura necessária aos quatro serviços - abastecimento de água, esgotamento sanitário, drenagem de água pluviais e limpeza urbana atualmente atingem uma amplitude muito maior, agrupando assim diversas outras atividades. Portanto, a engenharia antes conhecida como engenharia sanitária, que atualmente agrega não apenas as ações de engenharia, mas também de outras áreas profissionais como a gestão ambiental e mudanças climáticas, é tratada por vários autores e na literatura como engenharia ambiental (Júnior, 2018).

O perfil novo e interdisciplinar necessário para se lidar com a questão ambiental se tornou necessário para o mundo que vive as consequências das mudanças climáticas. Limar essas necessidades do campo da engenharia apenas tornaria a atividade obsoleta, sem atender as necessidades básicas do mercado e da sociedade. A engenharia ambiental, portanto, agrega todo tipo de aspectos, incorporando a abordagem ecológica, econômica, tecnológica, cultural e outras (Júnior, 2018). Nas palavras de Freire (1991), a engenharia

ambiental contempla todos os aspectos da vida humana e seu relacionamento com a base natural que a sustenta.

3.1 PANORAMA DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL

Com o fim da Segunda Guerra Mundial, o padrão de consumo no Brasil começou a se modificar, muito influenciado pelo modo de vida Norte Americano, cada vez mais presente na sociedade brasileira. Neste ponto, a população dos grandes centros urbanos foi mais diretamente influenciada, graças ao acesso fácil a bens e serviços.

Essa nova forma de consumo provocou o uso indiscriminado dos recursos ambientais, pontuando-se o crescente uso da água, o aumento das emissões de esgoto e o incremento da geração de resíduos sólidos.

Há de se destacar o surgimento de doenças veiculadas aos impactos do uso indiscriminado dos recursos ambientais. Nas palavras de Sousa *et al.* (2016), as desconformidades ou ausência do tratamento de água incidem sobre a ocorrência de doenças de veiculação hídrica, gerando impactos na vida e na economia nacional.

Não apenas no Brasil, mas a preocupação com a saúde pública se tornou uma preocupação para os governantes de toda a América Latina mesmo que tardiamente. Nas palavras de Sousa (2002), apesar da preocupação com as políticas públicas urbanas no início do século XIX, apenas em meados do século seguinte o abastecimento de água e o tratamento do esgoto se tornaram uma preocupação no país.

O saneamento básico no Brasil está instituído no âmbito do pacto federativo, sendo citado em três trechos da Constituição Federal (CF) de 1988 (Ferreira *et. al.* 2021) – 1. Artigo 21, parágrafo XX, no que se refere às competências da União: “Instituir diretrizes para o desenvolvimento urbano, inclusive habitação, saneamento básico e transportes urbanos”; 2. Artigo 29, parágrafo IX, no que se refere à competência comum dos Municípios, Estados, Distrito Federal e da União: “Promover programas de construção de moradias e a melhoria das condições habitacionais e de saneamento básico”; 3. Artigo 200, Parágrafo IV, no que se refere às competências do Sistema Nacional de Saúde (SUS): “Participar da formulação e da execução da política de saneamento básico” (Brasil, 1988).

A Carta Magna já cita o papel dos entes federados quanto ao planejamento e execução dos serviços de saneamento. Necessário aqui enfatizar o papel dos municípios que são os mais diretamente afetados pela presença e/ou ausência parcial ou total de

quaisquer um dos serviços. Neste caso, juristas e autores que tratam a temática do saneamento básico costumam citar a “tese municipalista” argumentada pelo Art. 30º da constituição, delegando ao Município “organizar e prestar, diretamente ou sob regime de concessão ou permissão, os serviços públicos de interesse local, incluído o de transporte coletivo”. Desta forma, como o serviço de saneamento básico possui interesse local, então estes seriam de responsabilidade municipal (Freire, 2017).

Ainda segundo o autor, com intuito de ratificar o papel dos municípios, a leitura do Art. 182 da CF permite uma maior clareza quanto ao assunto ao prescrever o seguinte: “a política de desenvolvimento urbano, executada pelo Poder Público municipal...tem por objetivo ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e garantir o bem-estar de seus habitantes” (Brasil, 1988). O Art.22 da CF inclui as atividades de saneamento básico na categoria “desenvolvimento urbano”, cabendo à União instituir diretrizes para o desenvolvimento urbano, inclusive habitação, saneamento básico e transportes.

Apesar de ser uma atribuição pública municipal, durante sua história, o Brasil já havia flertado com a privatização dos seus serviços de saneamento básico. Ao fim da década de 1990 e início dos anos 2000, os projetos de Lei 266/96 e 4.147/01 permitiriam a transferência da titularidade do serviço de saneamento básico dos municípios aos estados, garantindo assim aos investidores a segurança jurídica para a compra das companhias estaduais de água e esgoto.

Inicialmente, a partir da década de 50, o investimento em saneamento básico ocorreu de forma pontual (Leoneti *et al*, 2011), em pequenos períodos e apenas nas áreas urbanas das grandes cidades. A partir da década de 1970 e 1980, com a percepção da relação entre o fornecimento de água tratada e tratamento de esgoto com a redução das taxas de mortalidade (Soares *et al*. 2002). Ou seja, até então, o serviço de saneamento básico sempre teve como motivação a saúde pública.

O Quadro 1 a seguir apresenta um panorama histórico do saneamento básico no Brasil, desde meados do século XIX, citando o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANASA), até a promulgação da Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2021 que institui o novo marco legislativo do Saneamento Básico (Ferreira, 2021).

Quadro 1 História do saneamento básico no Brasil

Período	Ações
Século XIX até o início do século XX	• Organização das ações de saneamento sob a óptica da higiene pública, contribuindo para a redução da mortalidade por doenças de veiculação hídrica; • Aparelhamento dos sistemas de saneamento como solução a epidemias, mesmo antes da identificação dos agentes causadores de doenças;
Século XX até a década de 30	• Discussões políticas em torno da questão sanitária, ainda sob a visão central da saúde na agenda pública; • Saúde pública em bases científicas modernas a partir das pesquisas de Oswaldo Cruz; • Aumento do número de cidades com abastecimento de água e do uso de tecnologia em sistemas de esgotos, com opção pelo sistema separador absoluto, em um processo marcado pelo trabalho de Saturnino de Brito, que defendia planos estreitamento relacionados com as exigências sanitárias;
Décadas de 30 e 40	• Implantação do Decreto Federal 24.643, conhecido como código das águas (1934), que criou o primeiro instrumento de controle de recursos hídricos no Brasil, dando como prioridade o abastecimento público das águas; • Organização das ações de saneamento (sem prioridade) e assistência médica (predominante) essencialmente pelo setor de saúde;
Décadas de 50 e 60	• Primeiras iniciativas de estabelecimento de padrões de monitoramento dos parâmetros físicos, químicos e biológicos definidores da qualidade das águas e as primeiras classificações dos corpos d'água através de legislações estaduais de âmbito federal; • Persistem as discussões sobre a existência ou não de benefícios à saúde com a adoção dos serviços de saneamento básico;
Década de 70	• Predomínio da visão de que avanços nas áreas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário nos países em desenvolvimento resultariam na redução das taxas de mortalidade; • Criação do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA), com foco inicial no aumento dos índices de atendimento por sistemas de abastecimento de água.

	• Início da preocupação do meio ambiente na agenda política brasileira, com a consolidação dos conceitos de ecologia e meio ambiente e a criação da Secretaria Especial de Meio Ambiente (SEMA) em 1973.
Década de 80	• Maior rigor dos mecanismos responsáveis pelo cumprimento das condições de saúde da população, na ausência de condições adequadas de saneamento (água e esgotos). • Criação e implementação de uma série de instrumentos de âmbito nacional norteadores de políticas e ações do governo brasileiro, como a Política Nacional do Meio Ambiente (1981). • Revisão técnica das legislações relativas aos padrões de qualidade das águas.
Década de 90 até o início dos anos 2000	• Foco no conceito de desenvolvimento sustentável e de preservação e conservação ambiental, com ênfase nos recursos hídricos, refletindo diretamente no planejamento das ações de saneamento básico; • Instituição da Política do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Lei 9.433/97); • Aumento da avaliação dos impactos ambientais gerados pela presença e/ou ausência do saneamento básico;
Primeira década dos anos 2000	• Crescimento do debate sobre o direito a água e esgoto pela população, com a visão das desigualdades sociais presentes no país, tratando o saneamento básico como direito social; • Ineficiência da iniciativa privada em garantir o direito a água e esgoto à população; • Estabelecimento legal sobre a Política Nacional de Saneamento Básico e criação dos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB);
A partir de 2010	• Implementação da Lei 14.026/2020, conhecida como Marco Legal do Saneamento, permitindo a exploração dos serviços de saneamento básico pela iniciativa privada; • Remunicipalização dos serviços de saneamento básico em alguns estados e municípios;

Fonte: Adaptado de Branco *et al* (1991); Guimarães (2019); Frata (2019)

Mesmo com avanços ao longo da sua história, o saneamento básico no Brasil ainda é insipiente na maior parte do seu território continental, atendendo apenas uma parcela da população, estando mais implantado nas regiões sudeste e sul.

Os tópicos a seguir apresentam dados obtidos junto ao Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), plataforma aberta, mantida e alimentada pelo governo federal onde são apresentados os dados nacionais sobre o saneamento básico no Brasil. As informações apresentam um panorama geral dos 4 serviços do saneamento básico nas 5 macrorregiões geográficas do país no ano de 2021 (Brasil, 2021).

3.1.1 Abastecimento de Água

De acordo com a amostra do SNIS em 2021, cerca de 177 milhões de pessoas no Brasil são atendidas por um sistema de abastecimento de água completo ou simplificado, o que corresponde ao índice de atendimento de 84,2% da população total residente. No entanto, as diferentes condições socioeconômicas entre as macrorregiões no país são refletidas diretamente nos seus índices de atendimento. As macrorregiões Norte e Nordeste contam com 60% e 74,7% de atendimento, respectivamente, ao passo que no Centro-Oeste, no Sul e no Sudeste os índices são de 89,9%, 91,4% e 91,5%, respectivamente, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 Abastecimento de água nas regiões do Brasil

Região	Índice de atendimento (%)
Norte	60,0
Nordeste	74,7
Sul	91,4
Centro – Oeste	89,9
Sudeste	91,5
Brasil	84,2

Fonte: Autor, adaptado SNIS (2021)

3.1.2 Esgotamento Sanitário

Com relação ao tratamento de esgotos, do volume coletado pelo sistema público existente, 55,8% recebem tratamento antes de ser lançado no corpo receptor. No entanto, do volume gerado, em relação ao volume de água consumido, apenas 51,2% são tratados, ou seja, cerca de metade do esgoto produzido no país pode estar sendo lançado na natureza sem tratamento, contribuindo para os diversos problemas associados à essa prática. De forma similar ao caso do atendimento com o abastecimento de água tratada,

os menores índices de tratamento de esgoto gerado no país são identificados nas macrorregiões Norte e Nordeste, como mostrado na Tabela 2. Os dados apresentados refletem a dimensão do desafio a ser solucionado. É salutar questionar por que os índices de coleta e de tratamento de esgoto são relativamente baixos quando comparados, por exemplo, com os índices de atendimento com redes de abastecimento de água.

Tabela 2 Esgotamento sanitário

Região	Índice de atendimento (%)
Norte	14,0
Nordeste	30,2
Sul	48,4
Centro – Oeste	61,9
Sudeste	81,7
Brasil	55,8

Fonte: Autor, adaptado SNIS (2021)

3.1.3 Manejo de Resíduos Sólidos

Neste parâmetro, o SNIS apresenta não apenas a coleta dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), mas sim o conjunto de todo o manejo, aí incluído a 1. quantidade de coletada nos domicílios; 2. estimativa da disposição final no solo; e 3. varrição de rua. Assim, no ano de 2021, foi estimada a disposição de 64,10 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em 669 aterros sanitários (73,3% dos resíduos gerados), 1.572 lixões (15% dos resíduos gerados) e 595 aterros controlados (11,8% dos resíduos gerados). Enfatiza-se que, as estruturas lixão e aterro controlado são consideradas instalações inadequadas para disposição de RSU, mas que ainda assim correspondem juntas a 26,8% do total de RSU gerados. Na Tabela 3 são mostrados os dados de RSU por região.

Tabela 3 Manejo de resíduos sólidos urbanos

Região	Índice de atendimento (%)
Norte	79,0
Nordeste	82,4
Sul	91,6
Centro – Oeste	90,9
Sudeste	95,8

Brasil	89,9
--------	------

Fonte: Autor, adaptado SNIS (2021)

3.1.4 Drenagem e Manejo das Águas Pluviais (DMAPU)

O crescimento urbano ocorre em resposta à expansão das cidades, construção de vias, adensamento urbano, entre outros processos antrópicos, que alteram as características da superfície da bacia, especialmente das áreas com vegetação, que são reduzidas para dar espaço aos centros urbanos. Nesta situação, o comportamento do ciclo hidrológico também sofre mudanças. A substituição da vegetação por áreas urbanas causa a impermeabilização do solo, que tem como principal consequência a redução da quantidade de água da chuva infiltrada. A impermeabilização é um dos principais responsáveis por alterar o comportamento do ciclo hidrológico, pois menos água infiltra no solo e mais água é acumulada na superfície, contribuindo para o aumento do escoamento superficial.

Nas cidades, é comum existir áreas que sofram maior incidência de eventos hidrológicos. Nessas áreas pode-se identificar residências e imóveis que estão sujeitos a impactos negativos, por isso é importante registrar a quantidade de domicílios expostos à essa situação para estruturar medidas de segurança. Isto posto, é recomendado que a defesa civil das cidades mantenha um banco de dados atualizados e constante monitoramento, principalmente no período de chuvas, das áreas que sofrem algum tipo de risco de ocorrer os chamados “eventos hidrológicos impactantes” (EHI) – enxurrada, alagamento e inundação. Abaixo, na Tabela 4, são mostrados alguns dados sobre DMAPU no ano de 2021.

Tabela 4 Drenagem e manejo de águas pluviais

Índice de municípios (%)	Infraestrutura de DMAPU
43,5	Presença de sistema exclusivo para drenagem das águas pluviais urbanas;
11,9	Presença de sistema unitário (misto com esgotamento sanitário);
22,1	Presença de sistema combinado com drenagem;
4,2	Presença de algum tipo de tratamento de águas pluviais;
66,1	Presença de algum tipo de pavimentação;
17,2	Presença de redes ou canais subterrâneos;
14,2	Presença de soluções de drenagem natural (faixas e valas de infiltração em vias públicas;

Fonte: Autor, adaptado SNIS (2021)

3.1.5 Legislação do Saneamento Básico

Ao analisar o processo histórico do saneamento básico no Brasil, percebe-se que havia a necessidade de uma regulação que nortearia as ações que deveriam ser tomadas pelos entes estatais para que o saneamento básico fosse executado de forma adequada. Essa primeira regulação nacional surgiu na década de 1970, com o planejamento e execução do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANASA).

Com as alterações sociais e econômicas que o país passou nas décadas seguintes o PLANASA já não atendia mais as demandas que surgiram, sendo necessária uma nova discussão, que abarcasse a nova sociedade brasileira, uma legislação ambiental mais robusta e um planeta mais sustentável. Desta forma, no início da década de 90, iniciaram-se as discussões sobre um marco do saneamento básico brasileiro.

Isto posto, como forma de atender as demandas do país, diminuindo as desigualdades e promovendo o dever constitucional do desenvolvimento urbano, incluindo habitação e saneamento básico (Brasil, 1988), competência estabelecida no art. 21, XX, em 2007 foi editada a Lei nº 11.445/2007, conhecida como Marco Legal do Saneamento Básico, delineando as diretrizes nacionais para o setor.

Nas palavras de De Carvalho (2012), a Lei nº 11.445/2007 representou uma evolução quanto à concepção de um sistema normativo estruturado, causando uma revolução quanto às funções de planejamento, regulação e execução dos serviços públicos de saneamento básico no Brasil.

Frata *et al* (2022) cita que a Lei apresenta um grande avanço ao tratar da obrigatoriedade da elaboração e execução dos Planos de Saneamento Básico, tendo como obrigatoriedade que os planos sejam direcionados à gestão e ao gerenciamento de cada serviço de saneamento.

Entretanto, mesmo com uma política de abrangência nacional, algumas questões importantes ainda pairavam sem solução. Nas palavras de Phillipi Jr. (2012) quanto ao planejamento, com a mudança da legislação sobre a área do saneamento básico, ocorreu uma mudança de pensamento, ao reconsiderar o alcance, a responsabilidade, o formato e o prazo para sua elaboração, além de explorar a melhor forma de integrá-lo a outros planos, por exemplo os de bacias hidrográficas, planos diretores municipais, ambientais e da área da saúde. Por fim, De Carvalho (2012) afirma ainda que os estados e municípios tiveram a dificultosa missão de definir, de forma individualizada, um planejamento

próprio para os serviços de saneamento básico, obedecendo o arcabouço constitucional e as diretrizes propostas pela Lei nº 11.445/2007.

Por sua vez, visando atualizar, mitigar e eliminar alguns pontos conflituosos do Marco do Saneamento, em 15 de julho de 2020, foi publicada a Lei nº 14.026/2020, conhecida como o novo Marco do Saneamento Básico que traz profundas alterações em todo o arcabouço do sistema de saneamento básico no país (Leite, 2022). Suas alterações mais profundas estão relacionadas a titularidade, contratos, concessões, universalização, resíduos sólidos, dentre outros.

No Brasil, a Portaria do Ministério da Saúde Nº 888, de 4 de maio de 2021 (Brasil, 2021) estabelece os padrões de qualidade da água para abastecimento público, de modo a evitar prejuízos à vida humana.

Ainda segundo a mesma portaria, para a remoção de substâncias prejudiciais à saúde humana, satisfazendo assim os padrões de potabilidade estabelecidos, a água deve passar por vários processos de tratamento através de uma estação de tratamento de água – ETA.

Apesar dos grandes avanços, é notório que o Brasil ainda é insipiente quanto à prestação de serviços de saneamento básico. Mesmo o fornecimento de água e captação de esgoto sanitário apresentando as maiores taxas de atendimento, as grandes disparidades regionais chamam a atenção para o abismo no fornecimento dos demais serviços (Ferreira, 2021).

Como apresentado anteriormente, é do município o dever de prestar e construir os serviços de saneamento básico. Entretanto, tradicionalmente no Brasil, as companhias estaduais assumiram essa função principalmente em cidades menores. Para tanto, essas companhias têm adotado os modelos “Parceria Público Privadas (PPP’s)” e os chamados “Serviços Autônomos de Água e Esgoto - SAAE’s”.

3.2 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO

Dentre todos os recursos ambientais, a água é o mais importante e fundamental, pois sem ela a vida se torna inviável, sendo essencial para todos os seres vivos. Por muito tempo, foi considerada infinita, um recurso natural a disposição dos seres humanos para todos os fins. Este tipo de pensamento que foi mudado a partir do crescimento das cidades, aumento da população, dos resíduos e efluentes gerados. A certo ponto, a escassez em

várias cidades durante períodos no ano, acendeu um alerta na sociedade sobre a finitude da água e a necessidade de ações que permitam seu uso sustentável.

O abastecimento público tem se mostrado um desafio para os países. Atualmente, estima-se que um terço da população do planeta ocupe áreas com escassez de água graças a diversas razões como as mudanças climáticas, alterando o regime de chuvas, transformando assim regiões férteis em áridas e/ou semiáridas; ou mesmo conflitos regionais, como os ocorridos entre Turquia e Iraque pelas águas do rio Eufrates e entre Síria, Israel e Jordânia pelas águas do rio Jordão (Júnior, 2018).

Citado por Frata (2019), a poluição de mananciais, emissão de efluentes em corpos hídricos e o uso indiscriminado da água são comportamentos que devem ser combatidos para que tenhamos uma água de qualidade, não alterando seu ciclo, permitindo dessa forma que seu uso como recurso ambiental seja usado da forma adequada.

Desde que atingiu sua quantidade atual, o volume de água no planeta é constante, variando-se apenas seu estado físico e a forma como é encontrada na natureza. Estima-se que 75% da superfície do planeta esteja coberta por água (Júnior, 2018), com 97% sendo salgada, situada em oceanos e mares, restando 2,7% formado por geleiras, neve, vapor atmosférico e localizados em profundidades inacessíveis, sobrando 0,3% para aproveitamento direto. Ainda segundo o autor, outro agravante para a dificuldade no abastecimento público é a distribuição da água no planeta. Apenas três países possuem cerca de 60%.

A literatura apresenta uma discussão de valores sobre a quantidade de água doce no planeta para consumo, ou mesmo a quantidade total de água disponível (Tabela 5). Portanto, durante a realização deste trabalho, houve uma certa indecisão sobre qual valor adotar, visto que a consulta a vários trabalhos científicos, desde periódicos a livros, foi apresentada uma miríade de valores, que apesar de próximos, nunca foram exatos. Antes de adotar um valor, foi necessária a realização de um compilado apresentando alguns autores e seus valores de quantidade de água disponível no planeta para o uso do ser humano.

Outros autores valores e autores foram encontrados, mas todos aproximados aos valores da tabela acima. Desta forma, ao longo deste trabalho, optou-se por usar o valor citado por Philippi Jr. (2018), por ser mais atualizado e por ter sido, dentre os valores encontrados ao longo da pesquisa bibliográfica, o mais citado.

Tabela 5 Quantidade de água disponível por autor

Autor	Água doce	Água salgada	Água disponível para aproveitamento	Água para consumo humano¹
Philippi Jr. (2018)	2,7%	97%	2,7%	8%
Luiz Di Bernardo (2005)	5%	95%	5%	0,3%
Von Sperling (2005)	0,8%	99,2%	0,8%	3%
Tundisi, J. G (2003)	3%	97%	3%	0,3%

Fonte: Autor, 2024

Direito universal, o fornecimento de água de qualidade para a população é um dos fatores mais importantes para o desenvolvimento de uma sociedade mais justa e igualitária. A dualidade eliminação de doenças e aumento da qualidade de vida da população é condição *sui generis* para o desenvolvimento de qualquer país.

Entretanto, o fornecimento de água tratada ainda é deficiente em muitas cidades e mesmo em cidades que se apresentam com um eficiente sistema de tratamento de água, em bairros periféricos, não é incomum a falta ou racionamento de água. Nas palavras de Di Bernardo (2005), essa realidade se apresenta ou pela falha na construção do sistema de tratamento e fornecimento de água ou por operação e manutenção inadequadas, não raras, as duas situações.

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) de 2017, 39,7% dos municípios brasileiros não têm serviço de esgotamento sanitário. Ou seja, quase 40% do esgotamento sanitário do país não possui qualquer tipo de tratamento, sendo despejados de forma direta em mares, rios e lagos. Isso contribui seriamente para a queda na qualidade da água utilizada para o abastecimento humano (IBGE, 2017).

Para se tratar a água – aqui chamada de água bruta, ou seja, a água coletada diretamente do manancial - com uma qualidade inferior para o consumo humano, transformando – a em uma água potável, ela deve passar por uma série de processos ou operações de tratamento, constituindo assim em uma Estação de Tratamento de Água – ETA.

Esse tratamento nada mais é do que a alteração dos parâmetros físico, químicos e biológicos para valores que atendam a legislação nacional de qualidade de água potável. Segundo Richter (2009), para a produção de uma água potável, a escolha dos métodos deve ser realizada para permitir a eliminação ou a mitigação de determinados

¹ % da água doce disponível para aproveitamento

constituintes da água bruta. Desta forma, as principais condicionantes na escolha dos processos unitários são na natureza da água bruta e a qualidade desejada para a água tratada.

Do ponto de vista tecnológico, a água de qualquer qualidade pode ser, tecnicamente, transformada em uma água potável e adequada para o consumo humano. Para Di Bernardo (2005), os custos envolvidos, a forma de operação e a manutenção do sistema de tratamento são fatores decisivos na escolha de determinado corpo hídrico como fonte de abastecimento para consumo humano.

Ainda nesse ponto, para Richter (2005) o erro mais comum nos sistemas de tratamento de água é basear o tratamento da água em apenas uma única análise ou coleta em mananciais de abastecimento. A qualidade da água bruta é variável ao longo do tempo, exigindo para seu controle a realização constante de monitoramento dos seus parâmetros ao longo do ano. Para o autor, apenas a repetição das análises permite diminuir os efeitos da variação dos resultados obtidos ao longo do ano.

Frata (2019) afirma a importância de se caracterizar a água bruta para melhor se identificar quais as melhores técnicas de tratamento de uma ETA em função da água do manancial. Ainda sobre projetos de ETA's, Di Bernardo (2005) cita que esse tipo de projeto normalmente deve se basear em resultados obtidos em estudos de laboratório, de instalações constituídas por reatores estáticos ou, de preferência, “instalações piloto de escoamento contínuo”. Ainda que a qualidade da água bruta já seja conhecida, o *designer* do projeto pode incidir em erros graves quando escolhe a tecnologia de tratamento ou mesmo quando adota parâmetros de projeto.

Diante dos desafios para tratar uma água que por vezes possui uma carga poluidora de difícil remoção, é imprescindível garantir os padrões de potabilidade para consumo da população. Desta forma, Di Bernardo (2011) afirma que juntamente com os estudos de tratabilidade da água, é necessária uma abordagem maior, mais significativa, que aborde aspectos sociais, econômicos e ambientais. Nas palavras do autor, na escolha do melhor tratamento, é necessário realizar os seguintes levantamentos:

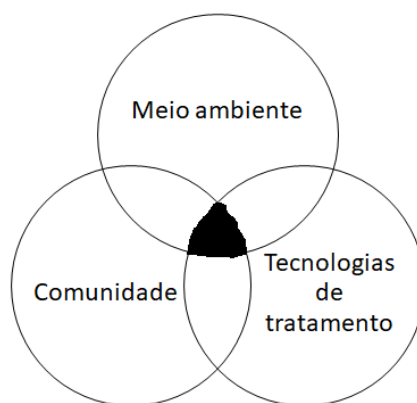
- ✓ Dos dados socioeconômicos da comunidade a ser abastecida, com objetivo de conhecer a realidade financeira, bem como sua capacidade de endividamento e mercado de trabalho. Este tipo de levantamento está ligado diretamente à tecnologia a ser adotada no tratamento da água, garantindo assim sua operacionalização contínua;
- ✓ Da qualidade da água bruta em conta das variações climáticas;

- ✓ No caso de a captação ser realizada em lagos, analisar as amostras de água de diferentes profundidades, garantindo a caracterização completa do corpo hídrico;
- ✓ Corrigir ou mitigar quaisquer problemas na captação ainda na fase de projeto da ETA, considerando mudanças sazonais na forma de captação;
- ✓ Verificar a necessidade de um tratamento preliminar, como auxílio ao sistema de tratamento a ser adotado;

Di Bernardo *et. al* (1999) cita que a escolha da melhor tecnologia de tratamento deve assegurar a sustentabilidade do sistema, permitindo que a água seja continuamente tratada e produzida em quantidade tal qual o período para o qual foi projetada. Para o autor, a sustentabilidade do sistema leva em consideração os “costumes locais, nível de mobilização social, capacidade de investimento, existência de mão de obra qualificada, disponibilidade de produtos químicos, porte do sistema, confiabilidade na operação e manutenção, padrão de potabilidade a ser atendido e quadro de saúde da população”.

A Figura 1 abaixo apresenta uma interação entre meio ambiente, tecnologias de tratamento e comunidade. Ela representa que a melhor escolha do sistema de tratamento de água deve ser o ponto de intercessão entre esses três fatores. Caso haja mais de uma alternativa, deve ser realizado um estudo comparativo para a melhor escolha de tratamento, que considere não apenas os fatores econômicos, como também o nível da sustentabilidade da solução por ocasião da implantação e durante a operação do sistema.

Figura 1 Interação entre meio ambiente, Comunidade e Tecnologias de Tratamento



Fonte: Autor, adaptado de Di Bernardo (1999)

Com a posse destas informações, a escolha da forma de tratamento a ser adotada na ETA se torna completa, uma vez que é possível “prever” quaisquer alterações ao longo

do período de realização do tratamento da água. Afirmando as palavras de Frata (2019), a escolha da tecnologia a ser empregada para tornar a água da captação adequada para o consumo, mostra-se indispensável a determinação das características da água bruta, visando escolher a tecnologia de tratamento mais adequada, levando em conta os parâmetros socioeconômicos e ambientais. E ainda, a depender das características, pode haver ou não a necessidade do uso de produtos químicos ao longo do processo, principalmente no processo de coagulação.

Ainda que se conheça os valores dos parâmetros da água bruta e se possua informações suficientes para a escolha da melhor forma de tratamento da água, o projetista não se sinta seguro ou mesmo não possua experiência em ETA's. Nestas situações e outras em que não existam informações suficientes sobre a água de captação, Richter (2005) justifica a necessidade do uso de “instalações experimentais” – muitas vezes chamadas de “estações piloto”, em uma escala adequada, que reproduzam os processos e as futuras unidades de tratamento, possibilitando desta forma, a obtenção de informações mais precisas e vantajosas, alinhando o projeto à realidade.

Como já dito anteriormente, toda água pode ser tratada, considerando-se os custos e a confiabilidade da operação. As tecnologias atuais se mostraram adequadas para o tratamento da água bruta, não sendo “robustas” (Frata, 2019), sem a necessidade de “reinventar a roda”, como novos métodos ou a criação de novos equipamentos. As características da água bruta determinarão o melhor tratamento já existentes, independentemente da sua qualidade em qualquer época do ano, uma vez que, já se possui a base das variações dos parâmetros da água ao longo deste período.

As unidades principais de um sistema de tratamento de abastecimento de água são apresentadas no Quadro 2 abaixo.

Quadro 2 Etapas do sistema de abastecimento de água

Unidade	Descrição
Captação	Retirada da água do manancial em quantidade para o abastecimento da comunidade local;
Adução	Condução da água desde a captação até a população a ser abastecida;
Tratamento	Eliminação de impurezas físicas – químicas e/ou biológicas;
Reservação	Atendimento às diversas necessidades de consumo da comunidade local;
Distribuição	Condução da água por tubulações através de diversos pontos de consumo;

Fonte: Adaptado de Richter 2009

As estações de tratamento de água são classificadas em função do tipo de tratamento que realizam. O Quadro 3 a seguir apresenta essa classificação e a descrição de cada tipo (Júnior, 2018).

Quadro 3 Classificação das estações de tratamento de água

ETA	Descrição
ETA de ciclo completo	Realiza todas as etapas de tratamento necessárias para tornar a água potável, incluindo captação, adução, tratamento preliminar, coagulação e floculação, sedimentação, filtração e desinfecção;
ETA simplificada	Realiza as etapas de tratamento mais fundamentais, sendo a captação, adução, coagulação e floculação, sedimentação e desinfecção;
ETA de osmose reversa	Utiliza a osmose reversa, que força a água a passar por uma membrana semipermeável, para remover impurezas ali presentes;
ETA de ultrafiltração	Utiliza a ultrafiltração, um processo físico que utiliza membranas com poros muito pequenos para remover impurezas da água;
ETA de aeração	Realiza a aeração da água, que consiste na introdução de ar na água, para remover impurezas;
ETA de cloração	Utiliza o cloro ou outro agente desinfetante para matar bactérias e outros microrganismos da água;
ETA Filtração direta	Usada no tratamento de água com turbidez e cor real com valores baixos, tornando mais simples o tratamento da água;
ETA de Dupla Filtração	Tecnologia que associa a filtração ascendente seguida da filtração descendente, garantindo maior remoção de microrganismos;

Fonte: Adaptado de Júnior (2018)

Oliveira (2020) afirma que em função da qualidade da água bruta durante o período chuvoso, em países tropicais a ETA de “ciclo completo” é a tecnologia de tratamento mais utilizada. No Brasil, aproximadamente 70% da população urbana – em torno de 142 milhões de pessoas (IBGE, 2022), é abastecida por essa categoria de ETA.

As etapas de tratamento de uma ETA de ciclo completo são as seguintes (Achon, 2016):

1. Coagulação - Quebra das partículas suspensas presentes na água bruta para em seguida, serem removidas nas etapas seguintes. Di Bernardo (2005) cita que nesta etapa, pode ser usado os sais de alumínio ou de ferro;
2. Floculação - Tem por objetivo o uso de produtos químicos para aglutinar as impurezas contidas na água (bactérias, protozoários e plânctons) em partículas maiores denominadas flocos que serão removidos na etapa de sedimentação e/ou filtração.

3. Decantação - Processo de retenção dos agrupamentos de flocos formados na etapa anterior. Nesta etapa do tratamento, procura-se evitar ao máximo a turbulência na água para que haja deposição das partículas sólidas suspensas (Philippi JR., 2018). Nesta etapa são usados decantadores, que podem ser convencionais ou de alta taxa, para que os flocos gerados no processo de floculação sedimentem;

4. Filtração - Unidade destinada a remover partículas em suspensão após a passagem da água pela etapa da decantação. Com camadas filtrantes simples ou duplas, formadas respectivamente por areia e sobreposição de areia e antracito. O sentido da água nesta etapa pode ser ascendente ou descendente (Di Bernardo, 2005).

5. Desinfecção – Tem por função eliminar da água os microrganismos que pode ser patogênico. A forma mais utilizada é a aplicação do cloro diretamente na água – barato e eficaz, impedindo a atividade metabólica desses patógenos. No Brasil, a Portaria de Consolidação nº 888/2021 serve de base para se atender as concentrações mínimas de cloro e outras substâncias como o flúor, na água para atendimento da população.

6. Fluoretação – tem como função a prevenção de cárie dentária;

Em algumas situações, a etapa de coagulação é precedida de uma oxidação, que são empregadas de acordo com a qualidade da água bruta e da água que se deseja produzir, geralmente empregada para oxidação da matéria orgânica e remoção da cor (Frata, 2019).

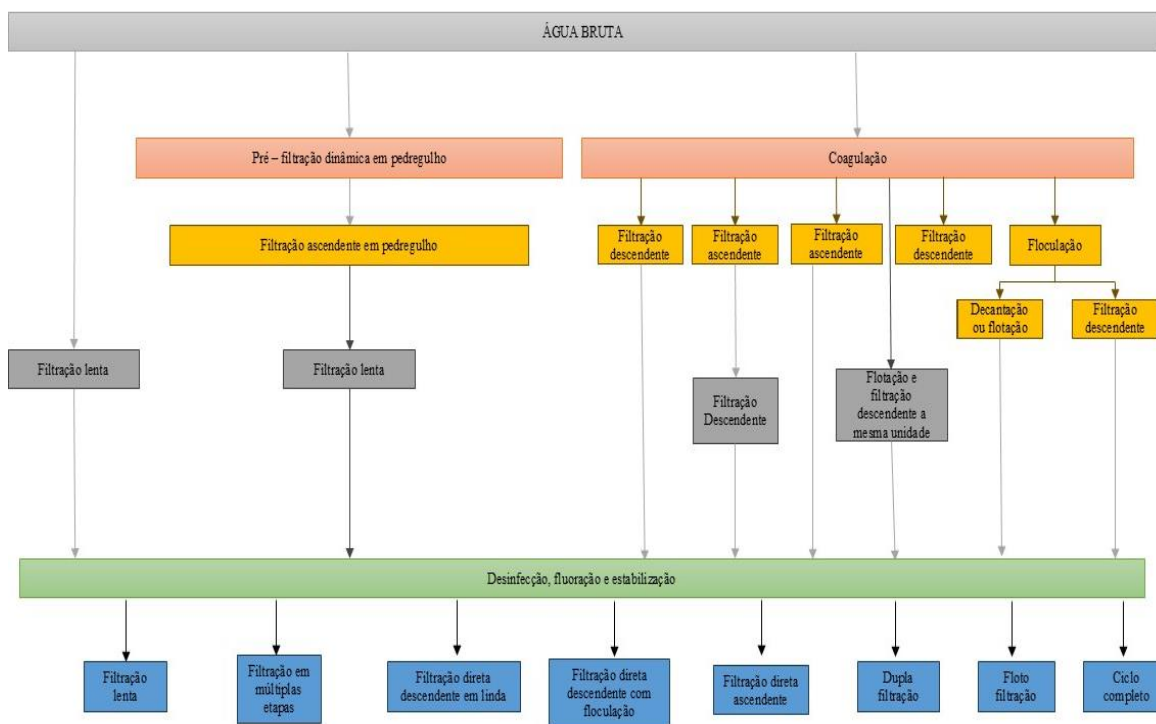
Além do processo acima citado, a etapa de desinfecção também pode ser realizada por morte natural através do armazenamento da água por determinado período antes e após o tratamento. Outra forma de aplicabilidade da etapa é o uso de agente químicos oxidantes desinfetantes – cromo, iodo, prata e ozônio. Por último, outra forma de desinfecção é a radiação ultravioleta, de origem natural ou artificial (Philippi Jr., 2018).

A etapa de desinfecção pode ser alterada pelos seguintes fatores (Di Bernardo, 2007):

- ✓ Espécie, concentração, condição e capacidade de resistência dos microrganismos a serem eliminados;
- ✓ Tipo e concentração dos desinfetantes existentes na água, dos quais resultam o tipo e a concentração dos elementos provenientes da reação do desinfetante com a água;
- ✓ Tempo de contato da água com o desinfetante;
- ✓ Características químicas e temperatura da água;

Di Bernardo (2011) sintetiza na Figura 2 abaixo as tecnologias de tratamento de água comumente usadas no tratamento de águas superficiais.

Figura 2 Principais tecnologias empregadas no tratamento de água no Brasil



Fonte: Adaptado de Di Bernardo (2011)

Uma consideração importante que envolve o tratamento de água e que de fato deve ser levada em consideração durante o processo de escolha das tecnologias a serem empregadas, planejamento e execução de uma ETA, são os resíduos gerados e o tratamento a ser adotado para estes resíduos. Essa temática será adotada ao longo dos próximos capítulos.

Para se operar um sistema complexo e robusto como uma ETA, ou mesmo se planejar e executar uma obra deste porte, profissionais capacitados são indispensáveis. Para Di Bernardo (2012), o profissional envolvido com o tratamento de água deve estar alinhado com o desenvolvimento da ciência e tecnologia, com a intenção de sempre produzir uma água de melhor qualidade, garantindo a segurança para o usuário do sistema e a proteção ao meio ambiente.

Garantir isso necessita que o profissional conheça as tecnologias mais recentes para o tratamento da água, que sejam viáveis economicamente, com uma infraestrutura adequada para o local, eficaz na sua operação e compatível com a realidade

socioeconômica e ambiental da região. Desta forma, estão garantidas a sustentabilidade da operação e a proteção contra quaisquer eventualidades sazonais e/ou mecânicas previstas e imprevistas.

3.2.1 Tratamento em Ciclo Completo

3.2.1.1 Coagulação e floculação

Esta etapa do tratamento envolve a coagulação da água bruta usando um sal de alumínio ou de ferro no mecanismo de varredura, formando precipitados do metal no coagulante, aprisionando assim as impurezas. Ocorre na unidade de mistura rápida, a qual pode ser hidráulica ou mecanizada, a depender da vazão a ser tratada, da qualidade da água bruta captada e não menos importante, das condições disponíveis de operação e manutenção. Além dos sais de ferro e alumínio, nesta etapa podem ser usados também os seguintes produtos químicos: polietrólitos para coagulação e floculação, cal hidratada para correção do pH e, a depender do caso, uso de cloro para pré-cloração (Philippi Jr., 2018).

O processo de coagulação consiste na formação de flocos a partir da união química das partículas coloidais. Após essa etapa, a água coagulada é submetida a uma agitação lenta durante um período até que os flocos alcancem tamanho e massa específica suficientes para que sejam removidos através da sedimentação nos decantadores ou por flotação no flotadores – estes podem ser mecânicos ou hidráulicos.

Essa etapa é o resultado de quatro mecanismos distintos: “compressão da camada difusa, adsorção e neutralização, varredura, adsorção e formação de pontes” (Di Bernardo, 2005). Ainda segundo o autor, a varredura é o mecanismo usado em ETA's de ciclo completo, possuindo floculação e decantação antecedendo o processo de filtração. Entretanto, os flocos gerados neste processo são de tamanhos maiores, resultando em velocidade de sedimentação alta, comparada aos flocos criados a partir do processo adsorção – neutralização (Menezes, 2019).

O desempenho da etapa de coagulação depende da correta seleção do coagulante e sua dosagem, bem como do pH certo para seu uso. Para se conhecer corretamente os parâmetros e concentrações citados, é comumente usado o ensaio em *JarTest*, cujos resultados proporcionam conhecer os valores de dosagem de coagulante e pH de coagulação, construindo assim o diagrama de coagulação (Ferrari *et. al.*, 2012).

A floculação envolve o processo pelo qual as partículas em estado de equilíbrio instável são forçadas a se movimentar com o objetivo de se atraírem, formando blocos que, devido à agitação, tendam a aderir uns aos outros (Richter, 2005). Após essa agregação, os flocos são separados por sedimentação ou flotação (Andrade, 2017).

Di Bernardo (2011) destaca que a depender da qualidade da água bruta, a agitação durante o processo de floculação deve ser alternada entre alta e baixa, necessitando de unidades mecanizadas para tal, aumentando o gasto de energia elétrica da ETA. Entretanto, sempre que possível, deve-se empregar a floculação hidráulica ou o uso de chicanas de madeira que provocam o desvio da água, aumentando o contato dos flocos. Assim como outras etapas de tratamento, a floculação é influenciada pelos seguintes fatores externos e internos à ETA (Di Bernardo, 2011):

- ✓ Tipo de coagulante
- ✓ pH da coagulação
- ✓ Temperatura da água
- ✓ Concentração da solução de coagulante
- ✓ Idade da solução de coagulante
- ✓ Idade da solução de coagulante
- ✓ Tempo da mistura rápida
- ✓ Gradiente da mistura rápida
- ✓ Tipo do equipamento de floculação
- ✓ Geometria do equipamento de floculação
- ✓ Qualidade da água bruta

3.2.1.2 Decantação

A decantação é um processo de retenção dos agrupamentos de flocos formados na etapa anterior. Neste processo, evita-se ao máximo a turbulência na água para que haja a deposição das partículas sólidas suspensas (Philippi Jr., 2018).

Outro conceito para este processo é apresentado por Richter (2005), afirmando que o processo de decantação é baseado na utilização da força da gravidade para separar partículas de densidade superior à da água, depositando-as em uma superfície ou zona de armazenamento. Para partículas com densidades próximas a da água ou de menor tamanho que não foram removidas durante esse processo, deverão ser retiradas no processo de filtração.

As estruturas onde se realiza esse processo são chamadas de tanques de decantação ou puramente de decantadores.

Quando o processo é realizado em grandes tanques, na maioria das vezes com escoamento horizontal (podendo também ser no formato vertical), providos ou não de mecanismos para remoção de lodo, recebe o nome de decantação convencional ou de alta taxa (Di Bernardo, 2011).

Para Philippi Jr. (2018), o processo de decantação é usado para águas com alta taxa de turbidez e cor e como já citados anteriormente, são realizados em estruturas chamadas decantadores. O Quadro 4 apresenta as classificações dos decantadores.

Quadro 4 Classificação dos decantadores

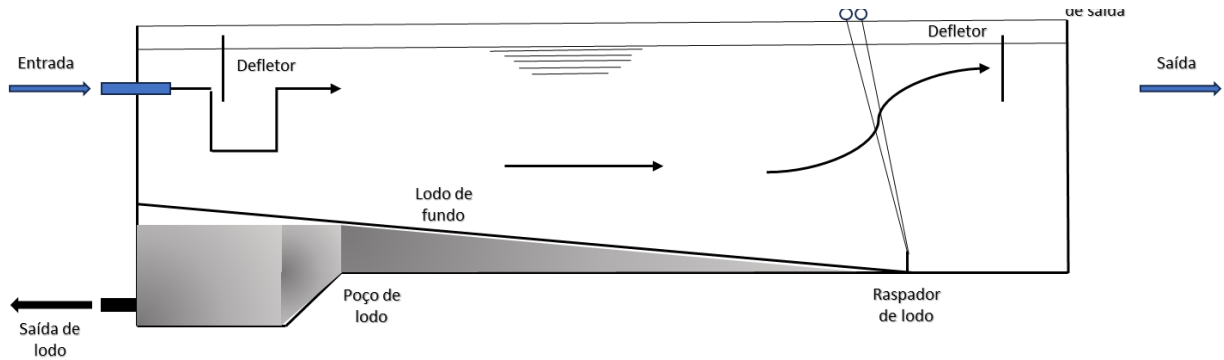
Decantador	Descrição
Escoamento horizontal	Entrada da água pela parte superior do decantador, se movendo no sentido longitudinal com uma baixa velocidade, objetivando a decantação dos flocos e impedir que o lodo depositado no fundo seja arrastado. Em comparação com os outros tipos de decantadores, apresenta um comprimento maior;
Escoamento vertical	Entrada de água pela parte inferior, sendo encaminhada para a superfície da estrutura. Com grande profundidade, deve-se ter cuidado com a velocidade de agitação para se evitar o arraste do lodo;
Clássico ou convencional	Recebe a água floculada e ocorre apenas a sedimentação;
Contato Sólido	Na mesma estrutura, ocorrem a mistura dos produtos químicos, a coagulação, a floculação e a decantação;
Escoamento laminar	O decantador possui dispositivo para aumentar a eficiência da remoção dos flocos, como placas inclinadas ou tubos;
Alta taxa	Uso de módulos de plástico, placas paralelas ou lonas de plástico com o objetivo de aumentar a área de contato diminuindo assim a altura destinada à sedimentação, promovendo de forma mais efetiva, o deslizamento dos flocos para o fundo do decantador;

Fonte: Philippi Jr. (2018), Di Bernardo *et al* (2017)

Os primeiros decantadores construídos no Brasil foram tanques de fluxo - ou escoamento horizontal (Richter, 2005), ainda no início do século passado. A Figura 3 abaixo apresenta o corte longitudinal de um decantador desta categoria.

As principais vantagens deste modelo de decantador estão na sua simplicidade de operação, alta eficiência e baixa sensibilidade a condições de sobrecarga. Graças a isso, ainda é muito recomendado por profissionais da área de saneamento.

Figura 3 Decantador regular de fluxo horizontal



Fonte: Adaptado de Freire (2023)

3.2.1.3 Filtração

O processo de filtração consiste na remoção de partículas suspensa e/ou coloidais, além de microrganismos na água que escoam através de um material poroso. De uma forma geral, a filtração é o processo final de remoção de impurezas realizado em uma ETA, sendo assim o principal responsável pela produção de água com qualidade que atenda ao padrão de potabilidade. Periodicamente, existe a necessidade de lavagem dos filtros, geralmente através da introdução de água no sentido contrário dos filtros (ascensional), com uma velocidade alta para promover a fluidificação parcial do meio granular, removendo as impurezas (Di Bernardo, 2011). Outros métodos de lavagem de filtros são os seguintes:

- ✓ Lavagem superficial ou sub – superficial com água por meio de torniquetes hidráulicos ou tubulação perfurada fixa, simultânea à lavagem com água no sentido ascendente;
- ✓ Lavagem com ar independente da lavagem com água no sentido ascendente;
- ✓ Lavagem simultânea com ar e água;

Di Bernardo (2017) afirma que matérias com granulometria apropriada usadas em filtros de ETA, em geral, são camadas de areia, antracito ou uma camada dupla com areia e antracito. O Quadro 5 abaixo apresenta os parâmetros a serem considerados para a escolha do material filtrante constituinte do filtro.

Quadro 5 Parâmetros observados na escolha do material filtrante

Parâmetro	Observação
Tamanho dos grãos	Máximo, mínimo, tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade;
Forma dos grãos	Coeficiente de esfericidade, fator de forma
Porosidade	-
Massa específica	Real e aparente;
Solubilidade	Ácido clorídrico e em hidróxido de sódio;

Fonte: Adaptado de Di Bernardo (2011)

Ainda segundo o autor, a depender da vazão de água a ser tratada e da quantidade de filtros na ETA, a melhor opção é o uso da filtração declinante variável, desta forma evitando o uso de equipamentos de controle de nível ou de taxa de filtração.

Frata (2019) exemplifica outras tecnologias que devem ser avaliadas para o tratamento de água:

- ✓ Filtração direta, podendo ser ascendente (FDA) ou descendente (FDD);
- ✓ Floto Filtração;
- ✓ Dupla filtração;
- ✓ Filtração lenta;
- ✓ Filtração em múltiplas etapas;
- ✓ Separação por membranas;

3.3 RESÍDUOS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Há tempos, o destino dos resíduos de uma estação de tratamento de água (RETA), também chamado de lodo, tem sido um corpo hídrico próximo à ETA, que por vezes é o local da captação da estação.

Di Bernardo (2017) afirma que além do lançamento direto em corpos hídricos, a rotina das ETA's apresenta situações que causam impactos ambientais acentuados em corpos hídricos: a lavagem seguida de filtros durante o período noturno, ou mesmo dois ou mais filtros diariamente; o uso de removedores mecanizados ou hidráulicos de lodo dos decantadores com descargas diárias ou ainda, ETA's que possuem decantadores convencionais com limpezas mensais durante um longo período do dia. O Quadro 9 apresenta os impactos ambientais gerados de forma direta e indireta pelo lançamento indiscriminado do lodo em corpos hídricos.

Quadro 6 Impactos ambientais gerados a partir do lançamento indiscriminado do lodo em corpos hídricos

Impacto	Aspecto
Aumento da quantidade e da diversidade de organismos patogênicos;	Direto
Acréscimo da concentração de compostos orgânicos tóxicos removidos ou formados no tratamento;	Direto
Incremento da concentração de metais tóxicos no sedimento do meio líquido;	Direto
Limitação da luminosidade do meio líquido devido ao aumento da concentração de sólidos suspensos totais (SST) afetando a reprodutividade da biota em geral;	Direto
Limitação ou interrupção do uso do corpo hídrico como fonte de dessedentação de animais ou como manancial de abastecimento de comunidades localizadas a jusante;	Direto

Fonte: Adaptado de Di Bernardo (2017)

Em todos os casos citados, os corpos hídricos são continuamente poluídos e contaminados, causando mal odor e impactos visuais deploráveis. Ressalta-se que vários desses corpos hídricos atravessam a zona urbana e são usados como fonte de irrigação, dessedentação de animais e em outras situações na zona rural.

No entanto, nas palavras de Richter (2007), a crescente preocupação e a criação das normas sobre a preservação e conservação ambiental através da recuperação da qualidade do meio ambiente vem restringindo ou mesmo proibindo o uso deste método de descarte do lodo e a forma mais impactante que as ETA's realizam sua manutenção e limpeza. Desta forma, as empresas de saneamento, a academia, governos e sociedade em geral vem buscando novas formas mais sustentáveis para o descarte adequado deste tipo de resíduo.

Em função do clima de cada região, a solução adotada em uma região pode não ser eficiente em outra. Di Bernardo (2017) cita o exemplo de países Europeus e da América do Norte, onde os RETA's são congelados – solução impossível em países de clima tropical como o Brasil.

Em nosso país, entre os métodos alternativos de disposição de RETA, pode-se citar o lançamento na rede coletora, em lagoas com longo tempo de detenção e o lançamento em terrenos e aterros sanitários (Richter, 2007). Já Barroso (2007) cita o uso em subprodutos como cerâmica e concreto, ressaltando a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre micropartículas desses produtos para visualizar potenciais usos.

Conforme Silva (2019), os RETA's podem ser divididos em 4 classes ou categorias:

- ✓ resíduo gerado na descarga dos decantadores, removidos em flotadores, na lavagem de filtros, no abrandamento e na remoção de ferro e manganês da água bruta;
- ✓ concentrado salino: resultante do tratamento de água por técnicas de membrana, osmose reversa, eletrodialise e troca iônica;
- ✓ carvão ativado e resinas de troca iônica desgastadas e material filtrante usado;
- ✓ emissões gasosas de unidade de controle de odor ou de técnicas de *air stripping*;

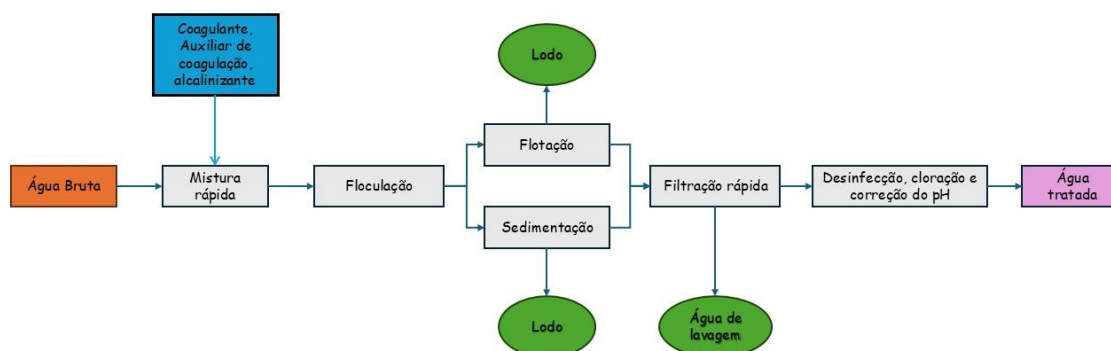
Dentre as categorias acima, os resíduos gerados em filtros e decantadores apresentam maior representatividade (Di Bernardo, 2017). Em ETA's, o maior volume é gerado durante a lavagem de filtros. Já para quantidades massivas, os maiores volumes são gerados a partir dos sistemas de separação sólido – líquido (decantadores e/ou floculadores quando se fala de estações de ciclo completo).

A literatura corrobora a afirmação acima. A presença de sólidos em água de lavagem possui concentrações de sólidos entre 50 e 400 mg/L – representando entre 2% e 5% do volume processo na ETA. Enquanto a operação de descarga em decantadores gera um resíduo entre 500 e 3.000 mg/L, bem mais concentrado e representando em torno de 0,3% do volume produzido pela ETA (Guimarães, 2019).

Em cada etapa produtora de resíduos na estação, as características apontadas de vazão e sólidos são distintas, razão pela qual diferentes concepções de tratamento devem ser consideradas. Ademais, outras atividades desenvolvidas na estação contribuem para caracterizar e quantificar os resíduos produzidos, tais como lavagens de filtros e tanques, além do preparo e aplicação de soluções químicas. Portanto, se considerarmos que cada tratamento é diferente um do outro, onde o uso de substância químicas diferentes para cada água com características próprias, não é errado afirmar que cada lodo é único, com valores de parâmetros próprios.

A Figura 4 a seguir apresenta as unidades de uma estação de tratamento de água que utilizam a coagulação química.

Figura 4 Unidades da ETA que são geradoras de resíduos



Fonte: Adaptado de Silva (2019) e Di Bernardo (2017)

Uma forma de caracterização dos resíduos, baseada na sua importância e objetivo do estudo é citada por Cordeiro (2002) da seguinte forma:

- ✓ Aspectos ambientais associados à disposição dos resíduos: pH, sólidos, metais, DQO, biodegradabilidade, toxicidade, pesticidas, fertilizantes e compostos orgânicos voláteis;
- ✓ Aspectos geotécnicos relacionados à remoção da água e a futuras utilizações dos sólidos dos resíduos: tamanho e distribuição das partículas, limite de plasticidade e de liquidez, resistência específica, respostas ao aquecimento e resfriamento;

De acordo com Di Bernardo (2017), a quantidade e a qualidade dos resíduos produzidos em uma Estação de Tratamento de Água dependem dos seguintes fatores:

- ✓ Qualidade da água bruta e da tecnologia usada no seu tratamento;
- ✓ Uso de oxidante e adsorvente
- ✓ Tipo e dosagem de coagulante e de alcalinizante ou de acidificante;
- ✓ Técnica de lavagem dos filtros;
- ✓ Habilidade dos operadores;
- ✓ Automação de operações na estação;
- ✓ Reuso ou não da água recuperada no sistema de tratamento;

Importante frisar que, ao longo das estações climáticas do ano, a qualidade e quantidade de água bruta captada por uma ETA é variável. Portanto, a quantidade e qualidade do lodo ali gerado também é variável. Assim, para se caracterizar corretamente

o resíduo de uma estação, é necessário o monitoramento do funcionamento das diversas unidades de tratamento durante todo o período.

3.4 TECNOLOGIAS PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS GERADOS EM ETA'S

O resíduo gerado em ETA's possui um elevado teor de umidade, dificultando assim seu transporte e destinação, gerando assim uma série de impactos ambientais.

O objetivo do tratamento dos resíduos gerados em uma estação de tratamento de água é obter as condições adequadas para sua disposição final. Segundo Richter (2007) essa condição envolve a retirada de água para concentrar a parte sólida, diminuindo assim seu volume – ainda nas palavras do autor, o lodo deve atingir o estado sólido ou semissólido. A desidratação ou a remoção da parte líquida do lodo pode ser realizada utilizando métodos mecânicos e/ou manuais (Reali, 1999).

Em síntese, para Richter (2007), trata-se de aplicar algum método de separação sólido – líquido, realizada tradicionalmente de duas formas:

- ✓ Filtração: operação unitária onde a separação sólido – líquido se dá através do fluxo da suspensão através de um meio ou de uma membrana porosa. A fase líquida ou filtrado passa através do meio ou da membrana e os sólidos são retidos no interior do meio ou na superfície da membrana.
- ✓ Separação gravitacional: método de separação onde os sólidos sendo submetidos a uma força (gravitacional ou centrífuga) são removidos em consequência de sua diferença de densidade em relação ao fluido.

Cada método anteriormente citado é realizado em uma unidade da ETA e Di Bernardo (2017) alerta que o(s) operador (s) da estação devem entender perfeitamente seu funcionamento através do monitoramento de parâmetros como o tempo de funcionamento diário, vazão da água tratada, características da água bruta e a dosagem dos produtos químicos utilizados.

Ao ser realizado o monitoramento das unidades da ETA, deve-se aprofundar sobre os dados de operação das estruturas que geram os resíduos, principalmente dos filtros e decantadores. O Quadro 7 apresenta os parâmetros que, nas palavras de Frata (2019), devem ser conhecidos sobre a produção de resíduos nas unidades operacionais da ETA.

Quadro 7 Parâmetros de monitoramento em filtros e decantadores para monitoramento da produção de resíduos

Unidade	Parâmetro
Filtros	✓ Tipo de meio filtrante;
	✓ Taxa de filtração;
	✓ Método de controle (taxa constante ou declinante, nível de água variável ou constante no interior dos filtros),
	✓ Tipo de lavagem (água, ar e água simultaneamente ou separadamente),
	✓ Frequência de lavagem;
	✓ Duração da lavagem;
	✓ Vazão utilizada;
	✓ Expansão promovida no meio filtrante;
	✓ Volume de água usado em cada lavagem;
	✓ Coleta amostras da água de lavagem de pelo menos dois filtros durante o tempo de lavagem;
	✓ Preparação de uma amostra composta e medição de suas características (SST, turbidez, cor);
Decantadores	✓ Tipo e número de decantadores (convencional ou de alta taxa);
	✓ Taxa de escoamento superficial;
	✓ Características da água floculada e decantada;
	✓ Eficiência de remoção de flocos;
	✓ Vazão afluyente a cada decantador;
	✓ Descarga hidráulica ou mecanizada (se mecanizada, dados do equipamento, tais como vazão, tempo de funcionamento por dia etc.);
	✓ Frequência de descarga;
	✓ Frequência de limpeza manual em decantadores sem removedor de lodo (duração da limpeza, vazão de mangueiras e, se possível, vazões mínima e máxima de descarga etc.);
	✓ Coleta de amostras durante a limpeza relacionadas com a vazão de descarga;
	✓ Preparação de uma amostra composta e medição de suas características (SST, DQO, DBO5 etc.);

Fonte Adaptado de Frata, 2019

A escolha do método de tratamento depende de alguns fatores, como a área e o custo de implantação, mão de obra para operar os processos, necessidade de armazenamento e condicionamento, além da logística para a disposição final do resíduo tratado (Reali, 1999).

3.4.1 Idealização dos Sistemas de Tratamento dos Resíduos de ETA

O planejamento do sistema de tratamento de resíduos em uma ETA passa pela escolha da tecnologia a ser adotada. Disto depende de um processo de verificação das condições operacionais da estação em estudo, considerando-se as características dos resíduos, o tamanho da área disponível e a logística local e regional, principalmente pela disponibilidade de local para o descarte. Fontana (2005), cita ainda nesse contexto que, pensando-se nos meios naturais de desaguamento do lodo, as condições locais, disponibilidade de área e o clima possuem grande importância nas decisões de qual método adotar.

O adensamento é uma das etapas mais essenciais no tratamento da fase sólida, pois, de maneira geral, os sistemas de desaguamento mecânico disponíveis no mercado recomendam que o teor de sólidos no descarte de entrada seja superior a 2% (20 g/L de SST) para que operem de maneira eficaz e econômica (Ferreira Filho e Além Sobrinho, 1998). O objetivo principal desse processo é remover a maior quantidade possível de água antes da etapa final de desaguamento. Normalmente, o adensamento é realizado por meio de decantação ou flotação, resultando em uma eliminação mais eficiente da água e, conseqüentemente, com redução de volume (Richter, 2005). Ainda segundo o autor, independentemente do tipo de sistema de adensamento utilizado, é crucial que haja um pré-tratamento com polímeros, com doses que geralmente variam entre 0,5 a 6,0 gramas de polímero/KG de sólido seco.

Segundo Di Bernardo (2007), as características quantitativas e qualitativas dos resíduos gerados pelas Estações de Tratamento de Água variam significativamente, dependendo das tecnologias de tratamento utilizadas. Desta forma, o projeto dos sistemas destinados ao tratamento desses resíduos pode diferenciar entre si.

Para Di Bernardo *et al.* (2017) os seguintes pontos devem ser observados quanto ao tratamento dos resíduos:

- ✓ Conhecer as propriedades micro e macro dos resíduos para melhor projeção das unidades de tratamento, adensamento e desaguamento.
- ✓ Contemplar, em projetos de novas ETA's, as unidades de tratamento dos resíduos.
- ✓ É necessário abandonar a ideia de limpeza manual dos decantadores e adotar, a partir de novas ETA's, o sistema mecanizado de remoção destes resíduos nestas unidades;

- ✓ Para ETA's já existentes, adaptar suas estruturas e operação para a remoção mecanizadas de lodo dos decantadores;
- ✓ Deve-se obter parâmetros de projeto de construção de estruturas de desaguamento adaptados para a realidade climática brasileira;
- ✓ É prudente o monitoramento da qualidade da água de recirculação das unidades de tratamento do resíduo com relação à protozoários e acrilamida;
- ✓ Em ETA's de pequeno e médio porte, deve-se adotar a tecnologia adequada para o tamanho da estação;
- ✓ Recomenda-se que as ETAs acompanhem o desempenho dos decantadores, flotadores e filtros, monitorando vazão e SST, a fim de determinar a quantidade de resíduos gerados, ao invés do uso de equações empíricas, e suas características, por um período que reflita as variações da qualidade da água bruta. Tais informações devem ser usadas para embasar o projeto das unidades de tratamento de resíduos.
- ✓ As operações e processos da ETA devem ser otimizados visando gerar uma quantidade menor de resíduos;

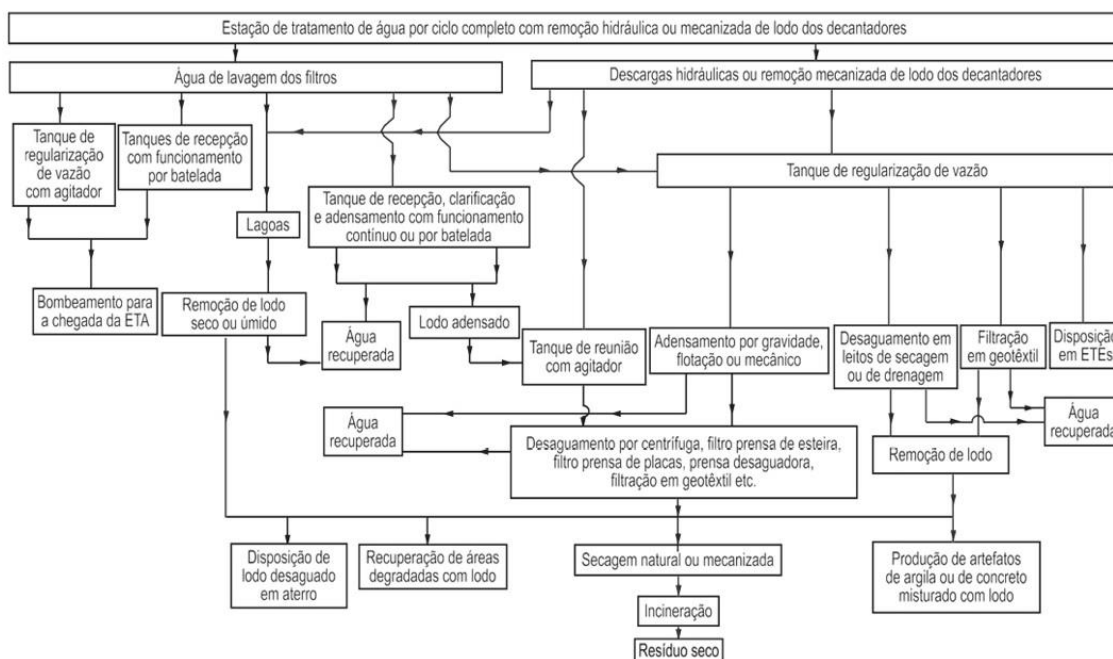
O tratamento do lodo é realizado em etapas, adotando em cada uma, um método adequado. A Figura 5 a seguir apresenta as alternativas pelas quais o lodo pode passar em uma ETA de ciclo completo até a sua destinação final, para que se possa realizar o descarte adequado.

As opções apresentadas incluem a água utilizada na lavagem dos filtros e os volumes das descargas, tanto hidráulicas quanto mecanizadas, dos decantadores. A qualidade da água bruta é o que vai determinar a frequência com que as descargas serão efetuadas. O SST na água a partir da lavagem dos filtros pode exceder os 500 mg/L e a do resíduo dos decantadores pode variar de 2 a 10 g/L nas descargas hidráulicas e de 5 a 20 g/L nas descargas da remoção mecanizada (Di Bernardo, 2017). Ainda em trabalhos do autor, em ensaios realizados em colunas de sedimentação e em *jar test* com amostras de água bruta coletadas em diferentes estações do ano, a massa de SST gerada diariamente pode ser calculada em função dos SST na água coagulada.

Em ETA's de ciclo completo que utilizam tanques para receber a água de lavagem dos filtros, funcionando de forma contínua com agitador ou em sistema por batelada, o resíduo gerado é simplesmente recirculado para a câmara de chegada da água bruta. No entanto, essa prática não é recomendada por autores e/ou técnicos da área de

saneamento (Silva, 2019) (Di Bernardo, 2011), uma vez que a água de lavagem dos filtros contém uma grande quantidade de microrganismos, incluindo alguns bastante resistentes aos pré-oxidantes comumente empregados nas ETAs, o que comprometeria a qualidade sanitária da água tratada.

Figura 5 Possibilidades de tratamento de resíduos de ETA de ciclo completo



Fonte: Di Bernardo *et al.* (2017)

Segundo Di Bernardo *et al.* (2017), as alternativas para tratamento do resíduo de ETA podem ser resumidas da seguinte forma:

1. Encaminhamento da água de lavagem de filtro (ALF) e da descarga do decantador para lagoas: a parte seca ou úmida removida a partir da limpeza de uma lagoa pode ser enviado a aterro sanitário, ou ser usado na recuperação de áreas degradadas, para sistema de secagem natural ou sistema mecanizado, e/ou para instalações de produção de materiais a base de cimento e areia ou de argila;

2. Recepção, clarificação e adensamento da ALF: a água clarificada é direcionada para a câmara de chegada de água bruta da ETA e o resíduo encaminhado para um tanque provido de agitador; dependendo do teor de SST, esse resíduo pode ser desaguado em centrífugas ou em filtro prensa de placas, esteira, desaguadora ou para sistemas de desaguamento baseados em geotêxteis, como *bag*; neste ponto, a água que passou pelo processo anterior pode ser recirculada para a câmara de chegada da ETA; o

resíduo desaguado pode ser direcionado à aterro sanitário, ou ser usado na recuperação de áreas degradadas, para sistema de secagem natural ou sistema mecanizado, e/ou para instalações de produção de materiais a base de cimento e areia ou de argila;

3. Tanque de recepção provido de agitador para regularização de vazão da ALF e descarga de decantador: desse tanque, os resíduos podem passar pelo processo de adensamento por gravidade em estruturas específicas ou por flotação ou em unidades mecânicas, resultando lodo adensado e água; a água pode ser recirculada para a câmara de chegada da ETA e o lodo adensado ser desaguado em centrífugas ou em filtro prensa de placas, esteira, desaguadora ou para sistemas de desaguamento baseados em geotêxteis, como *bag* e a partir daí, a água recuperada pode retornar à câmara de chegada de água bruta da ETA, enquanto o resíduo desaguado pode ser direcionado à aterro sanitário, ou ser usado na recuperação de áreas degradadas, para sistema de secagem natural ou sistema mecanizado, e/ou para instalações de produção de materiais a base de cimento e areia ou de argila; ou os resíduos podem ser desaguados em leitos de secagem ou de drenagem ou ser filtrados em geotêxtil, resultando água recuperada e resíduo, o qual pode ter os mesmos destinos indicados em ; por fim, os resíduos podem ser dispostos em estações de tratamento de esgoto.

3.4.2 Desaguamento de Resíduo de ETA

O desaguamento de resíduos é um processo destinado a aumentar o teor de sólidos suspensos totais (SST), resultando em uma redução do volume de descarte a ser disposto. Esse processo pode ser realizado utilizando equipamentos mecanizados, como centrífugas, filtros prensa de esteira, filtros prensa de placas e prensas desaguadoras tipo parafuso, além de métodos naturais, como lagoas de lodo, e técnicas de filtração em leitos de secagem, leitos de drenagem e sistemas fechados de geotêxteis. Cada método de desaguamento apresenta características, vantagens e especificações, sendo essencial que os projetistas considerem os custos de instalação, operação e manutenção (Figura 6). Em todos os métodos, busca-se alcançar uma torta de resíduo com teor de SST acima de 20% (Di Bernardo *et al.* 2012).

Richter (2007) cita em ordem crescente de custo os equipamentos de desaguamento mecânico mais usados no mercado: prensa desaguadora, centrífuga, filtro prensa e filtro rotativo a vácuo.

As tecnologias mecanizadas combinam um sistema gravitacional com um sistema de filtração no processo de desaguamento. Na maioria dos casos, é utilizada em locais com baixa disponibilidade de área, mas que objetivam uma taxa maior de teor de sólidos. A seguir, no Quadro 8 são citadas quatro vantagens e quatro desvantagens do método de secagem mecanizada segundo Di Bernardo (2005).

Figura 6 Tecnologias de desaguamento utilizando sistemas mecanizados



Fonte: Autor, 2024

Quadro 8 Vantagens e desvantagens dos sistemas mecanizados de secagem

Vantagens	Desvantagens
Menor área para implantação e manejo;	Elevados cursos de implantação e manutenção
Não existe empecilhos como mudanças climáticas para o seu funcionamento;	Possibilidade de geração de gases no processo;
Menor custo de transporte do resíduo até o destino	Necessidade de pessoal qualificado e energia elétrica para manejar o sistema
Diversifica as possibilidades do emprego do lodo como cobertura de aterros e uso como matéria – prima, principalmente na construção civil;	O resíduo precisa passar pelo desaguamento antes de ser processado no secador;

Fonte: Adaptado de Di Bernardo 2005

O Brasil, graças a sua grande área disponível, reúne as condições necessária para a adoção dos sistemas naturais (Figura 7) para o tratamento dos resíduos gerados em ETA’s. Esses sistemas são divididos em lagoas de lodo, leitos de drenagem e bags de

drenagem. Silva (2019) afirma que a combinação de recursos naturais e área disponível com um baixo custo de implantação e manutenção tornam esse sistema de secagem muito vantajoso para o país.

Figura 7 Tecnologias de desaguamento utilizando sistemas naturais



Fonte: Autor, 2024

Pela necessidade do uso de grandes áreas, esse sistema é mais indicado para ETA's de pequeno porte, maioria dos municípios do país usam ETA's pequenas, onde a geração de lodo é menor. Outra desvantagem é a interferência direta das mudanças climáticas. Como vantagem, os sistemas de desaguamento natural utilizam apenas a gravidade e a evaporação. O Quadro 9 apresenta as vantagens e desvantagens do uso dos sistemas naturais de desaguamento.

Quadro 9 Vantagens e desvantagens dos sistemas naturais de secagem

Vantagens	Desvantagens
Menor gasto de energia elétrica;	Necessidade de grandes áreas de implantação;
Em condições climáticas favoráveis, o processo de secagem se torna bastante eficiente;	O sistema exige conhecimento das condições climáticas locais;
Não há a necessidade de pessoal qualificado para o manejo do sistema;	Necessário máquinas para revolver o lodo periodicamente;

Diversifica as possibilidades do emprego do lodo como cobertura de aterros e uso como matéria – prima, principalmente na construção civil;	O sistema ainda não foi totalmente desenvolvido, necessitando de mais estudos para sua implantação ideal;
--	---

Fonte: Autor, 2024

A principal questão a ser respondida na escolha de um método de desaguamento, seja ele mecanizado ou natural é o teor de sólido no resíduo a ser direcionada à etapa de desaguamento. A depender da situação da ETA, há a necessidade de um tratamento prévio (adensamento) com o intuito de elevar o teor de sólidos do resíduo (Cornwell, 1987). A Tabela 6 apresenta os valores mínimos para os teores de sólido que o lodo deve apresentar para serem submetidos à tecnologia de desaguamento.

Tabela 6 Teor de sólidos do resíduo antes e após o processo de desaguamento

Tecnologia de desaguamento	Teor de sólidos antes do tratamento (%)	Teor de sólidos após o desaguamento (%)
Centrífuga	2% (Di Bernardo et al., 2012)	20-30% (Cornwell, 1987)
Filtro prensa de esteiras	1% - 5% (Di Bernardo et al., 2012)	20-25% (Cornwell, 1987)
Tubo Geotêxtil	1% (Di Bernardo et al., 2017)	20-30% (Guimaraes et al., 2014)
Leitos de secagem	-	30-40% (Silveira, 2012)
Lagoa de lodo	-	7-15% (Cornwell, 1987)

Fonte: Autor, 2024

Há cerca de uma década, o desaguamento de resíduos era quase exclusivamente realizado por meio de lagoas, filtro prensa e centrífugas. No entanto, as desvantagens desses sistemas, como o longo tempo de desidratação, capacidade limitada e altos custos, abriram espaço para o desenvolvimento de novas tecnologias que exigem baixa drenagem e manutenção. No final dos anos 90, os tubos geotêxteis foram utilizados pela primeira vez para desaguamento de resíduos de estações de tratamento de esgoto (FOWLER et al., 1997).

3.5 MATERIAIS GEOTEXTEIS

O uso de geotecidos como tecnologia para o desaguamento de lodo de ETA's é uma das várias tecnologias empregadas para o tratamento deste tipo de resíduo. De baixo

custo e com uma alta eficiência, é muito usado principalmente para o desaguamento de lodo gerado em decantadores (Silva, 2019).

O processo é semelhante a outras formas de filtração. Nas palavras de Silva (2017), consiste na remoção da água presente no lodo através do escoamento do líquido através do geotêxtil, retendo a fração sólida, permitindo que o líquido passe pelo material.

Os primeiros usos de geotêxteis relatados na literatura relatam no início da década de 1990, com o desaguamento de resíduos de esgoto (Silva, 2019), permitindo o controle das várias variáveis de entrada e saída do sistema.

O processo de desaguamento é influenciado por alguns fatores, sendo citado por Urashima (2010) os seguintes: taxa de viscosidade do líquido, distribuição granulométrica e porcentagem de sólidos na polpa, área superficial do sólido e formato da partícula.

Além dos resíduos gerados em ETA's, os o emprego do desaguamento em geotêxteis tem sido muito usado para a aplicação em resíduos gerados em outras áreas, como a mineração. Isso se dá pela comprovação da eficiência ambiental, técnica e econômica. A seguir são apresentadas outras vantagens do uso desse material (Silva, 2019):

- ✓ Redução do volume do resíduo;
- ✓ Facilidade de manuseio, transporte e disposição final dos sólidos;
- ✓ Fácil operação e manutenção;
- ✓ Não necessita de grandes áreas;

As formas mais usuais dos geotêxteis são o formato de tubo, container e *bag*, se diferenciando em forma e volume (Góis, 2015). Das três, a mais usada é o formato de *bag*. De variados tamanhos, seu uso consiste no preenchimento com lodo até sua capacidade máxima.

Independente do formato, é necessária uma análise da eficiência do geotêxtil. Durante o processo de desaguamento, ocorrem dois fenômenos: a retenção dos sólidos e a liberação da água. Ambos devem estar em equilíbrio e se isso não ocorre, a eficiência do geotêxtil é comprometida. Góis (2015) cita vários fatores que influenciam o equilíbrio dos fenômenos no geotêxtil e destaca os seguintes: gradação de sólidos e quantidade de água no resíduo e o tamanho da abertura do geotêxtil.

Silva (2017) cita que outro aspecto a ser considerado durante a remoção da água no geotêxtil é a sua permeabilidade. Esta não permanece constante graças ao entupimento

dos poros de escoamento. Para Muthukumaran e Ilamparuthi (2006) o entupimento também é uma função da retenção de sólidos, assim como a diminuição da eficiência da permeabilidade. Contudo, ainda segundo o autor, o tamanho da abertura do poro do geotêxtil e o teor de água do lodo são variáveis que tem significativa influência sobre a permeabilidade. Na Figura 8 estão exemplos de *bag's* para desaguamento e de lodo já desidratado em *bag*.

Figura 8 Bag para desaguamento do lodo e lodo desidratado em bag



Fonte: SNATURAL AMBIENTE (2024)

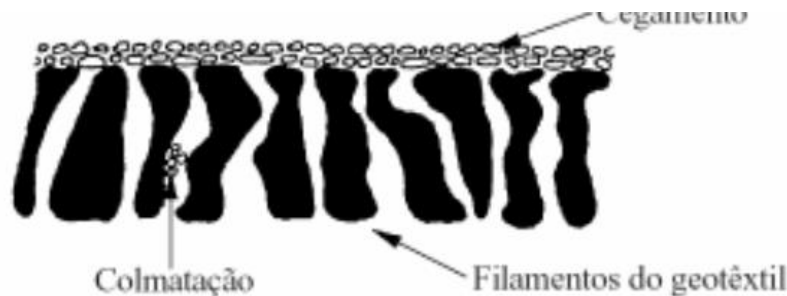
Durante a etapa de preenchimento dos bags, é realizada a aplicação de um condicionante químico no lodo para auxiliar no processo de floculação (Silva, 2017), garantindo assim uma maior eficiência na retenção da parte sólida no interior da estrutura. Após saturado, o bag é mantido em repouso para que haja, de forma mais eficiente, o desaguamento da parte úmida, seguida da secagem do resíduo, facilitando assim a destinação final do lodo.

Uma vez satisfeita as condições de permeabilidade e retenção do geotêxtil, é necessário avaliar o funcionamento do filtro em função das interações entre o material a ser filtrado e o geotêxtil, o que pode levar ao processo de colmatação (Carrol, 1983). Este é definido por Silva (2017) como a penetração das partículas de sólidos dentro do geotêxtil, bloqueando os canais de fluxo ou formando partículas finas a montante do filtro, reduzindo sua permeabilidade.

No processo de desaguamento, o fluxo de água pode levar o arraste de algumas partículas da parte sólida do lodo. Esse arraste vai de encontro à estrutura do geotêxtil, gerando as seguintes interações (Silva, 2019):

- ✓ Erosão interna (*piping*): partículas do material desaguado passam continuamente através do geotêxtil;
- ✓ Bloqueamento (*blocking*): partículas individuais do material filtrado obstruem as aberturas do geotêxtil, formando o mecanismo conhecido como bloqueamento de filtro, que implica numa severa redução da permeabilidade do geotêxtil;
- ✓ Cegamento (*Filter cake*): as partículas mais finas do material migram, segundo o processo de sufusão (movimento das partículas mais finas pelos poros da matriz de partículas mais grossas do solo), em direção ao geotêxtil. No caso dessas partículas possuírem um tamanho suficiente para impedir a passagem através dos polos do geotêxtil, elas se agrupam formando uma fina camada na superfície interna. Chamada de *filter cake*, ela reduz substancialmente a capacidade de drenagem da estrutura (Figura 9).

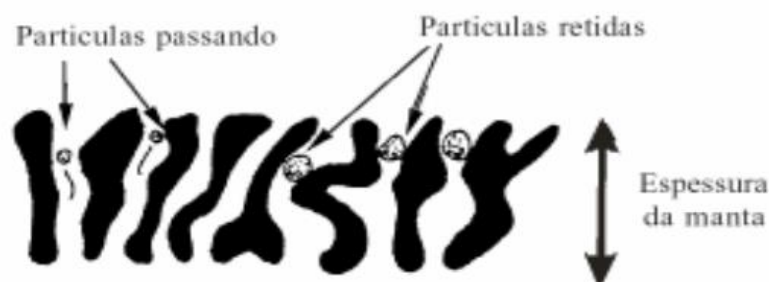
Figura 9 Cegamento em geotêxtil



Fonte Adaptado de John (1987) apud Barroso (2007)

- ✓ Colmatação interna: retenção de partículas de solo as quais se movimentaram junto ao fluído ao longo da espessura do geotêxtil (Figura 10);

Figura 10 Colmatação



Fonte Adaptado de John (1987) apud Barroso (2007)

3.8.1 Mecanismos de Filtração em Geossintéticos

O uso de uma manta geotêxtil como material filtrante necessita o conhecimento das seguintes propriedades hidráulicas (Barroso, 2007):

1. Permeabilidade normal à manta: permite avaliar a facilidade com que o fluido atravessa um meio poroso. Para se calcular a permeabilidade do geotêxtil, usa-se a Lei de Darcy através da Equação 1 (Barroso, 2007); (Ortiz, 2022):

$$v = k \cdot i \quad (1)$$

Onde: v é a velocidade aparente de fluxo (m/s); k é o coeficiente de permeabilidade do geotêxtil (m/s); i é o gradiente hidráulico (m/m).

Existe uma discussão sobre os métodos de determinação da permeabilidade em geotêxteis. Ortiz (2022), já citava que geotêxteis idênticos em espessura e estrutura, mas com espessuras distintas podem apresentar o mesmo valor de permeabilidade (k), destacando que essa propriedade inerente do geotêxtil é variável graças à porosidade do tecido. Barroso (20007) acrescenta ainda que a permeabilidade pode variar ainda com a tensão normal aplicada, em função da espessura deformável das mantas construídas com material não tecido, impossibilitando desta forma, a comparação entre vários geotêxteis diferentes. Portanto, para minimizar a influência da espessura das mantas, faz necessário o uso do chamado “termo de permissividade” (Barroso, 2007); (Ortiz, 2022) dada pela Equação 2 abaixo.

$$\psi = \frac{K}{T_g} \quad (2)$$

Onde: ψ é a permissividade; K é o coeficiente de permeabilidade; T_g é a espessura do geotêxtil (mm).

2. Permeabilidade no plano normal do geotêxtil (Ortiz, 2022), também chamada de Permeabilidade no plano da manta, ou ainda, transmissividade (Barroso, 2007); (Carneiro, 2009) é definida como a capacidade de fluxo hidráulico no plano do geotêxtil. Esta depende da espessura, da distribuição e dimensão das aberturas dos geotêxteis. Os geotêxteis tecidos possuem normalmente transmissividade baixa, enquanto os não tecidos possuem transmissividade elevada. É determinada através do cálculo da vazão através de corpos de prova (Barroso, 2007) em função da tensão normal e do gradiente hidráulico. Ortiz (2022) calcula a transmissividade através da Equação 3.

$$\theta = K_p T_g \quad (3)$$

Onde: θ é a transmissividade do geotêxtil (cm^2/s); k_p é a permeabilidade do geotêxtil ao longo do seu plano (cm/s) e T_g é a espessura do geotêxtil (mm).

Segundo Silva (2017), os sistemas de filtração com o uso de geotêxteis são dimensionados para atender os critérios de retenção e permeabilidade. Para o autor, sob um fluxo de água em condições dinâmicas e/ou estáticas, o atendimento a critério de retenção visa impedir a passagem das partículas de solo através do filtro. Entretanto, segundo a permeabilidade, o escoamento do líquido deve ser constante e sem obstáculos. Desta forma o filtro deverá possuir aberturas pequenas o suficiente para prevenir a excessiva passagem das partículas sólidas para o exterior do geotêxtil; contudo, estas devem ser grandes o suficiente para permitir um adequado fluxo do líquido, sem a redução da vazão do filtrado.

O Quadro 10 abaixo, adaptada de Lopes e Lopes (2010), mostra as propriedades mais importantes dos materiais geotêxteis para a execução de determinadas funções.

Quadro 10 Propriedades e funções dos geotêxteis

Propriedade	Drenagem	Filtragem	Separação	Reforço	Proteção	Barreiras de fluidos
Espessura	3	1	-	-	3	2
Compressibilidade	3	2	-	-	1	-
Resistência à tração	-	-	1	3	1	1
Módulo de rigidez	-	-	-	3	-	2
Deformabilidade	-	-	3	1	1	3
Resistência ao rasgamento	-	-	3	2	3	3
Resistência ao funcionamento	-	-	3	2	3	-
Atrito	-	-	-	3	1	-
Transmissividade	3	1		-	-	-
Distribuição de poros	2	3	2	-	-	-
Permissividade	2	3	2	-	-	-

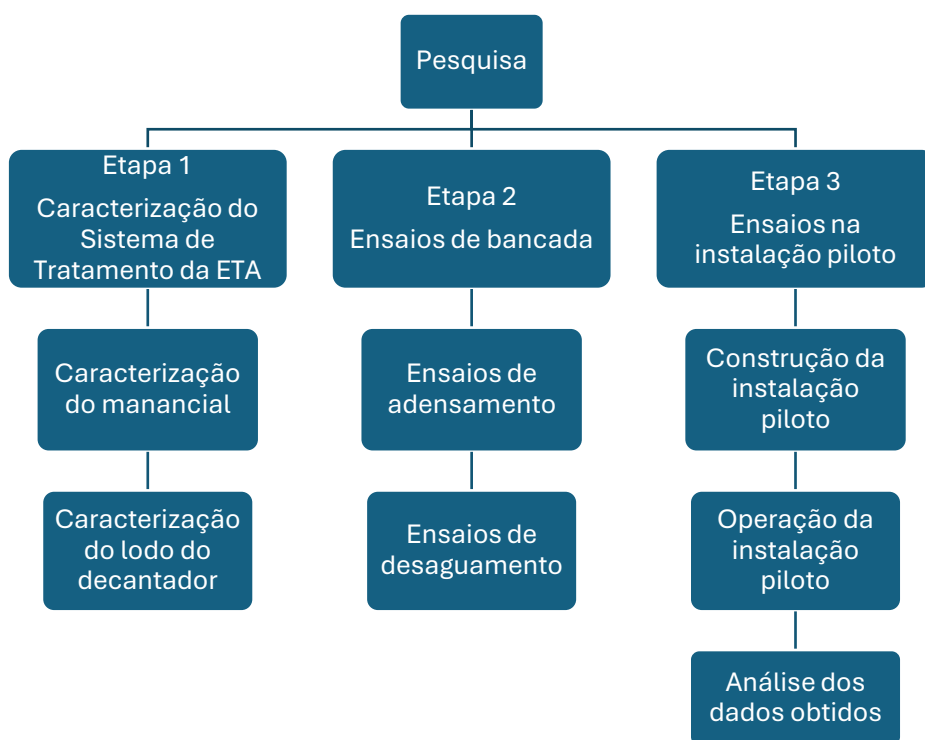
Fonte: Autor, adaptado de Lopes e Lopes (2010)

Onde: 1 Propriedades de pouca significância; 2 Propriedade de média significância; 3 Propriedade de grande importância.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a etapa metodológica do trabalho, abordando desde a etapa inicial de decisão do tema a ser trabalhado, passando pelo trabalho experimental e apresentação dos resultados. A pesquisa será desenvolvida em cinco etapas que são apresentadas na Figura 12 a seguir.

Figura 11 Etapas da pesquisa



Fonte: Autor, 2024

4.1 EQUIPAMENTOS, MÉTODOS E PRODUTOS QUÍMICOS

Os equipamentos utilizados na pesquisa, as especificações e a função de cada equipamento são apresentadas na Tabela 7 a seguir. Nos ensaios de bancada e na instalação piloto, a Tabela 8 apresenta os parâmetros físico – químicos, unidades, métodos de medição e limites de detecção realizados segundo os métodos indicados no APHA (2012).

Tabela 7 Equipamentos utilizados na pesquisa

Equipamento	Finalidade
pHmetro (potenciômetro), modelo 230 - marca Orion	Leitura de pH
Turbidímetro AP 2000 - marca PoliControl	Leitura da turbidez
Espectrofotômetro visível, modelo DR/2000, marca Hach	Leitura de cor, alumínio, fósforo, amônia, nitrito
Analizador de Carbono Orgânico Total COT-L – marca SHIMADZU	Análise de carbono orgânico total
Medidor de Umidade ID200	Leitura da umidade
Fonte: Autor, 2024; Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP, 2024	

Tabela 8 Parâmetros, métodos, unidade e limite de detecção

Parâmetro	Unidade	Metodologia	Limite de detecção (LDM)
pH	-	Eletrométrico	0,01
Turbidez	NTU	Nefelométrico	0,1
Demanda química de oxigênio (DQO)	mg/L O ₂	Espectrofotométrico	10
Carbono orgânico total (COT)	mg/L C	Combustão Infravermelho	0,1
Ferro	mg/L Fe	EAA-Chama	100
Alumínio	mg/L Al	EAA-Forno de Grafite	-
Sólidos Totais (ST)	g/L	Gravimétrico	-
Sólidos dissolvidos totais (SDT)	g/L	Gravimétrico	-
Sólidos suspensos Totais (SST)	g/L	Gravimétrico	-
Umidade	%	Termogravimétrico	-

Fonte: Autor, 2024

A Tabela 9 apresenta os produtos químicos, nome comercial, aspecto e fornecedora. As informações técnicas sobre os produtos químicos usados na pesquisa são apresentadas no anexo A deste trabalho.

Tabela 9 Produtos químicos utilizados na pesquisa

Polímero	Nome comercial	Aspecto	Fornecedora
Aniônico	Artfloc 1530	Emulsão branca	ARATROP
Não iônico	Artfloc 2530	Emulsão branca	ARATROP
Catiônico	Artfloc 3530	Emulsão branca	ARATROP

Fonte: Autor, 2024

4.2 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

Para a caracterização do local de estudo e melhor descrever o município de Araguatins – TO, bem como suas particularidades, foram realizadas visitas *in loco* aos órgãos públicos oficiais do município, órgãos estaduais – Secretaria Estadual de Recursos Hídricos e Agência Tocantinense de Saneamento; órgãos federais – Fundação Nacional de Saúde, Ministério do Meio Ambiente e Agência Nacional de Águas. Também foram realizadas consultas aos seguintes documentos: o Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS), o Plano Municipal de Saneamento Básico de Araguatins, o Atlas do Desenvolvimento Humano, o censo de 2022 e 2023 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), além de diálogos com os gestores e técnicos envolvidos diretamente no sistema de abastecimento de água municipal. Utilizou-se ainda mapas com limites do município e cartas planialtimétricas do IBGE.

Levou-se em consideração os dados mais atuais encontrados, possibilitando uma análise bastante realista da população e como o serviço de abastecimento de água se apresenta para esta realidade. O caráter dessas visitas foi a busca de documentos oficiais que caracterizassem o serviço de abastecimento de água municipal e a sua história de implantação para que o processo de fornecimento de água municipal atingisse índices mais elevados de qualidade.

O período de visitas corresponde aos meses de novembro e dezembro de 2023 e de janeiro a julho de 2024.

4.2.1 Caracterização do Manancial que abastece a ETA de Araguatins

As coletas de água do manancial para caracterização físico – química foram realizadas na altura da bomba de captação da ETA utilizando frascos de polietileno para

coleta de água. Após a coleta, os frascos foram refrigerados para posterior análise dos seguintes parâmetros: cor aparente, turbidez, série de sólidos, pH, demanda bioquímica de oxigênio (DQO), carbono orgânico total (COT), ferro e alumínio. Os métodos usados para análise estão descritos na Tabela 8.

Foram realizadas cinco coletas durante os meses de dezembro de 2023, abril, maio, junho e julho de 2024, abrangendo os períodos seco e chuvoso na região. A Figura 15 mostra a visão aérea da ETA e do ponto de realização das coletas.

Figura 12 Vista aérea da ETA de Araguatins e do ponto de coleta de água



Fonte: Autor, 2024

4.2.2 Caracterização da ETA

Para esta etapa da pesquisa, foram programadas visitas técnicas na estação de tratamento de água objetivando verificar toda a infraestrutura e métodos usados para o tratamento da água, além da estimativa de produção de resíduos (em kg de resíduo/m³ de água tratada) e da quantidade de água tratada em m³/dia. Nessa fase as informações existentes foram levantadas com objetivo de caracterizar o sistema no período no qual os ensaios foram realizados. Vale ressaltar que as características dos resíduos ensaiados no teste de bancada e na instalação-piloto, referem-se ao resíduo coletado na descarga do decantador.

Foram levantadas do sistema de informação do SEMUSA todas as condições operacionais da ETA no período de novembro e dezembro de 2023 e de janeiro a julho de 2024. Nesta mesma oportunidade, realizou-se um compilado dos principais parâmetros

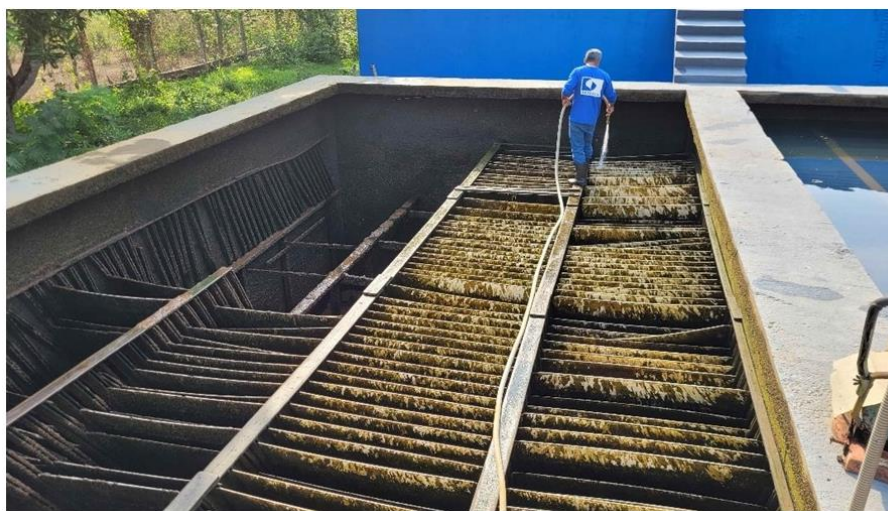
hidráulicos de funcionamento da ETA de Araguatins conforme relatórios disponibilizados pelo setor de Projetos da atual e das gestões passadas do SEMUSA.

4.2 ETAPA II: CARACTERIZAÇÃO DO LODO

A coleta do resíduo da ETA de Araguatins foi realizada durante os períodos de limpeza do decantador da unidade, realizada uma vez ao mês em dias alternados – a escolha da data se dá em função da qualidade da água presente no decantador e da presença de uma turbidez elevada. A coleta foi realizada durante os meses de dezembro de 2023 e abril de 2024. A Figura 13 mostra o procedimento de limpeza do decantador.

Optou-se pela coleta nos períodos seco e chuvoso, sendo realizada uma coleta e cada período. Portanto, a condução deste trabalho envolveu a análise e uso de duas amostras de resíduo coletadas no mesmo decantador.

Figura 13 Procedimento de limpeza do decantador



Fonte: Autor, 2024

A coleta se deu diretamente do fundo do decantador, através do uso de recipientes para transportar o lodo até dois reservatórios – ambos de 250 L presentes na ETA (Figura 14). Cada reservatório armazenou uma amostra diferente de resíduo.

Figura 14 Decantador onde foram realizadas as coletas do resíduo



Fonte: Autor, 2024

A coleta teve por objetivo armazenar uma quantidade de resíduo suficiente – denominado de “Resíduo Base” – objetivando a caracterização do lodo, a realização dos experimentos planejados e os ensaios da estação piloto (Figura 15).

Figura 15 Reservatório e resíduo base coletado



Fonte: Autor, 2024

4.2.4 Caracterização dos Resíduos da ETA de Araguatins

A caracterização das amostras do resíduo base foi realizada no Laboratório de Química e Bioquímica do IFTO – Campus Araguatins, na cidade de Araguatins – TO; no

Laboratório de Saneamento do IFTO – Campus Palmas, na cidade de Palmas – TO e no Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP, na cidade de Ribeirão Preto – SP. As metodologias das análises adotadas ao longo do trabalho a descrição de APHA et al. (2017).

4.3 ETAPA II: ENSAIOS DE BANCADA

Com o objetivo de observar a influência da concentração de SST do resíduo base e da dosagem de polímero ideal para os ensaios de desaguamento em manta geotêxtil, foram testados diferentes tipos de polímero e dosagens variadas – estas apresentadas na Tabela 7. Quanto aos polímeros, o planejamento desta fase da pesquisa buscou determinar a eficiência de três tipos – catiônico, aniônico e não aniônico – e estabelecer o mais hábil para ser usado no ensaio de adensamento do resíduo coletado.

O lodo, coletado em duas épocas diferentes no mesmo decantador da ETA em estudo (uma no período seco e outra no período chuvoso), após caracterização, resultou em diferentes concentrações de sólidos totais. Para o cálculo dos volumes de polímero adicionados, foi utilizada a Equação 4 a seguir. As concentrações de polímero foram calculadas a partir da concentração de SST e da dose de polímero desejada, calculadas de acordo com a Tabela 6 (Di Bernardo *et al.*, 2017).

$$C_{pol} = D_{pol} \left(\frac{mg \text{ polímero}}{g \text{ SST}} \right) . SST \left(\frac{g \text{ SST}}{L \text{ lodo}} \right) \quad (4)$$

C_{pol} é a concentração da solução de polímero em função dos SST da amostra em mg/L; V_{con} é a concentração do polímero preparado em g/L; D_{pol} é a dosagem de polímero desejada em mg/g e SST é a concentração de SST em g/L.

As dosagens de polímeros foram baseadas nos valores obtidos por Queiroz *et al.* (2019) e Ismail *et al.* (2022) ao realizar ensaios de adensamento em trabalhos na área de desaguamento com geotêxteis. Na Tabela 10 é apresentado um resumo dos ensaios, sendo os de 3 a 10 realizados em quintuplicada. Foi realizado também ensaios denominados Branco, para a condição sem condicionante químico.

Tabela 10 Polímeros e concentrações usados nos ensaios de adensamento

Ensaio	Concentração do lodo em g/L SST	Polímero	Dosagem de polímero (mg Pol/g SST)
1	15,20	-	-
2	22,03	-	-
3	15,20	ART FLOC 1530 – Aniônico	0,5
4		ART FLOC 2530 – Não Iônico	1,25
5		ART FLOC 3530 - Catiônico	2,5
6			5,0
7	22,03	ART FLOC 1530 – Aniônico	0,5
8		ART FLOC 2530 – Não Iônico	1,25
9		ART FLOC 3530 - Catiônico	2,5
10			5,0

Fonte: Autor, 2024

4.3.1 Ensaios de Adensamento por Gravidade do Lodo de ETA

Os ensaios de adensamento por gravidade para determinação da concentração ótima dos polímeros para o desaguamento do resíduo em estudo. Foram realizados em uma proveta devidamente graduada, com diâmetro igual a 3,5 cm e altura igual a 23,0 cm e volume de 500 mL, apresentada na Figura 16.

Figura 16 Proveta graduada



Fonte: Autor, 2024

As soluções de polímeros utilizadas nos ensaios foram preparadas consistindo em adicionar 1,0 g de polímero concentrado em 1,0 L de água destilada, obtendo – se assim uma concentração de 1,0 g/L, seguido por agitação durante 1 hora com o objetivo de “abrir a cadeia” (Figura 18) (Ismail, 2022; Talmage *et. al*, 1995; Di Bernardo, 2012).

Este processo foi realizado para cada um dos polímeros utilizados no trabalho (catiônico, aniônico e não aniônico), resultando em três soluções de 1 g/L para cada condicionante.

Após o processo de abertura dos polímeros, foi iniciado o ensaio de adensamento do lodo. Inicialmente, houve o despejo na proveta do lodo acrescido da dose de polímero obtida através da Equação 4, totalizando 500 mL solução. A seguir, a agitação manual por um minuto, sendo deixado em repouso até a estabilidade.

O próximo passo foi o registro da altura da interface do clarificado, sendo apontado em cronômetro o tempo de sedimentação do lodo analisado – a cada 0,5cm sedimentado, registrava-se o tempo em cronômetro e anotado em uma planilha para o controle. O processo era finalizado com o cessar da sedimentação e a estabilidade da solução.

Figura 17 Agitação para abertura de polímero



Fonte: Autor

Este processo foi realizado por quintuplicada e na última rodada do experimento com cada um dos polímeros, foram registrados a altura da proveta para o tempo de 30min e de 24 h. Os dados foram registrados em planilha do Microsoft Excel, sendo posteriormente, construídas as curvas de sedimentação, contemplando o tempo de decantação dos ensaios de adensamento e a altura da interface.

Além do uso dos polímeros, também foi realizado o ensaio de adensamento sem adição do polímero – esse ensaio foi chamado de “branco” e teve por objetivo verificar a sedimentação do lodo em estado puro, seguindo a mesma metodologia de controle do tempo em função da altura de sedimentação.

4.3.1.3 Avaliação dos ensaios de adensamento

Como parâmetro para se avaliar os efeitos das diferentes dosagens de polímero pesquisadas, foi escolhido Índice Volumétrico de Lodo (IVL). Nas palavras de Peixoto (2008), o IVL é um parâmetro importante, uma vez que quantifica as propriedades do lodo, em particular sua sedimentabilidade, sendo calculado através da Equação 5.

$$IVL = \frac{H_{30} \cdot 10^6}{H_0 \cdot SST} \quad (5)$$

Onde IVL é o Índice volumétrico do lodo (mL/g); H_{30} é a altura da interface após 30 min (m); H_0 é altura da interface no instante 0 min (m) e SST é a concentração dos sólidos suspensos (mg/L).

A Tabela 11 abaixo apresenta os as faixas de valores do IVL segundo Von Sperling (2016):

Tabela 11 Faixa de valores do IVL

Sedimentabilidade	IVL (mL/g)
Ótima	0-50
Boa	50-100
Média	100-200
Ruim	200-300
Péssima	>300

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2011)

Desta forma, a escolha do polímero usado nas duas amostras do lodo durante a pesquisa, foi baseada no menor IVL encontrado durante os ensaios de adensamento em bancada.

4.3.2 Montagem do Sistema de Desaguamento em Manta Geotêxtil em Bancada

O sistema de desaguamento em manta geotêxtil de bancada em foi usado para a execução dos ensaios, sendo construído de forma a permitir o desaguamento do resíduo. Os materiais usados para a construção desta estrutura são de fácil acesso e a montagem não exige ferramentas mais complexas. Desta forma, sua instalação pode ser realizada em quaisquer locais, inclusive em campo. A Figura 18 apresenta o sistema de filtração em manta geotêxtil em bancada.

Figura 18 Sistema de filtração em manta geotêxtil de bancada



Fonte: Autor (2024)

O sistema consiste em um suporte de madeira com três espaços para alocar três tubulações de 50 mm de diâmetro onde os discos de manta geotêxtil foram presos na parte inferior com o auxílio de uma braçadeira de plástico. O líquido filtrado foi coletado e armazenado em um béquer de vidro para posterior análise.

4.3.2.2 Ensaios de desaguamento em manta geotêxtil de bancada

O ensaio do sistema de filtração em manta geotêxtil de bancada seguiu a metodologia descrita por Miratech (2005) e Lawson (2006), adaptada por Silva (2019), denominada “ensaio de teste em cone geotêxtil”. Nas palavras do autor, a metodologia empregada neste ensaio é considerada simples e rápida para se determinar a quantidade em porcentagem de material retido na manta em estudo e a qualidade do filtrado obtido

Seguindo a metodologia proposta, este ensaio em triplicata foi realizado seguindo os procedimentos abaixo:

1. Foram selecionados 5 volumes diferentes da solução de lodo adicionados a dosagem de polímero selecionada nos ensaios de adensamento em bancada: 100 mL, 200 mL, 300 mL, 400 mL e 500 mL;
2. Em seguida, despejou-se o volume através da estrutura montada com o geotêxtil, armazenando o volume filtrado em um béquer;
3. A partir daí, foi registrado o tempo em uma tabela do Microsoft Excel© 2013 em função do volume filtrado, consistindo em, a cada 30 segundos, e o volume presente no béquer. O experimento foi finalizado quando a vazão de desaguamento ficou inferior a uma gota (0,0025 mL) por segundo;
4. Após a fase de desaguamento, foi coletado o filtrado e analisado os valores de turbidez.

O intuito em se realizar os ensaios a partir de diferentes volumes iniciais foi de verificar a quantidade de lodo a ser desaguado, e a taxa de filtração, calculada pela Equação 6 a seguir.

$$\text{Taxa} = \frac{\Delta \text{Volume}}{\text{Área} \cdot \Delta \text{Tempo}} \quad (6)$$

Em que, ΔVolume é a diferença entre o volume inicialmente despejado no sistema e o volume acumulado no béquer em mL; área em m² usada no ensaio de desaguamento em bancada; ΔTempo é o tempo de realização do desaguamento em segundos.

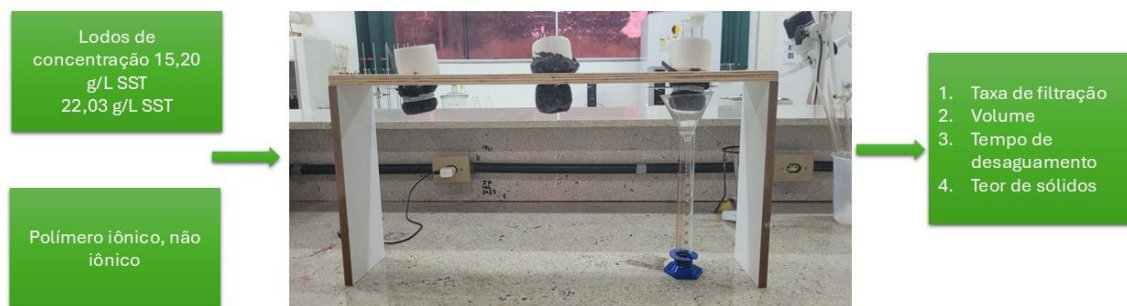
4.3.2.3 Avaliação dos ensaios de desaguamento em manta geotêxtil de bancada

Os ensaios de desaguamento em bancada apresentam um conceito base que envolve os experimentos na estação piloto, avaliando a taxa de filtração, o volume e o tempo de desaguamento. Neste ponto, dentre os cinco volumes analisados, será considerado o que apresenta uma média desses comportamentos, visto que na rotina de uma ETA, existe uma variedade de circunstâncias em que o tecido geotêxtil será utilizado, dependendo de fatores como condições climáticas, quantidade de lodo produzido, tempo de uso e desgaste do material.

Ao se extrapolar o volume obtido no ensaio de desaguamento em bancada para a estação piloto, a carga hidráulica e a altura da *filter cake* (H_f) foram consideradas na instalação para que os resultados sejam condizentes com os que foram encontrados nos ensaios de bancada.

A partir disso, foram analisados taxa de filtração, volume e tempo de desaguamento para selecionar uma condição otimizada, para ser extrapolada e operada na estação piloto. A Figura 19 mostra a apresenta os dados de entrada e de saída dos ensaios de desaguamento em bancada.

Figura 19 Representação da avaliação do ensaio de desaguamento em bancada



Fonte: Autor, 2024

4.3.2.4 Manta Geotêxtil Bidim

A manta geotêxtil Bidim é um tipo de material têxtil sintético, geralmente feito de fibras de poliéster ou polipropileno, utilizado em diversas aplicações de engenharia civil e ambiental. Graças ao seu baixo custo, é amplamente utilizada em obras de drenagem, controle de erosão, reforço de solos e proteção de geomembranas.

Em todas as etapas deste trabalho, foi usado o geotêxtil bidim® GT07 por ser de mais fácil acesso e muito usado em obras de drenagem do solo. O Quadro 11 a seguir apresenta as características do bidim usado na pesquisa e a Figura 20, uma amostra do Geotêxtil Bidim® GT 07 usado durante o trabalho de pesquisa.

Quadro 11 Características do Geotêxtil Bidim® GT 07

PROPRIEDADES		UNIDADES	Bidim® GT07	NORMAS
Resistência à tração	Valor na ruptura - L	kN/m	4,70	ABNT NBR ISO
	Alongamento - L	%	>50	10319/2013
Resistência ao puncionamento CBR		kN	0,7	ABNT NBR ISO 12236/2023
Largura		m	2,30 – 4,60	-
Comprimento		m	100	-
Matéria-prima e tecnologia			100% Poliéster	

Fonte: Techduto, 2012

Entre as vantagens do uso do Bidim, destacam-se suas características em se adaptar a diferentes tipos de superfícies, inclusive as mais irregulares; a redução da espessura dos sistemas de drenagem em comparação com métodos tradicionais, o que diminui a dispersão do terreno e otimiza o uso do espaço disponível; facilidade de instalação, acelerando o processo e evitando os custos da obra; menor necessidade de material granular, o que reduz os custos de transporte; aumento da durabilidade das estruturas, além de contribuir para a preservação ambiental.

Figura 20 Amostra do Bidim® GT07 usado na pesquisa



Fonte: Autor, 2024

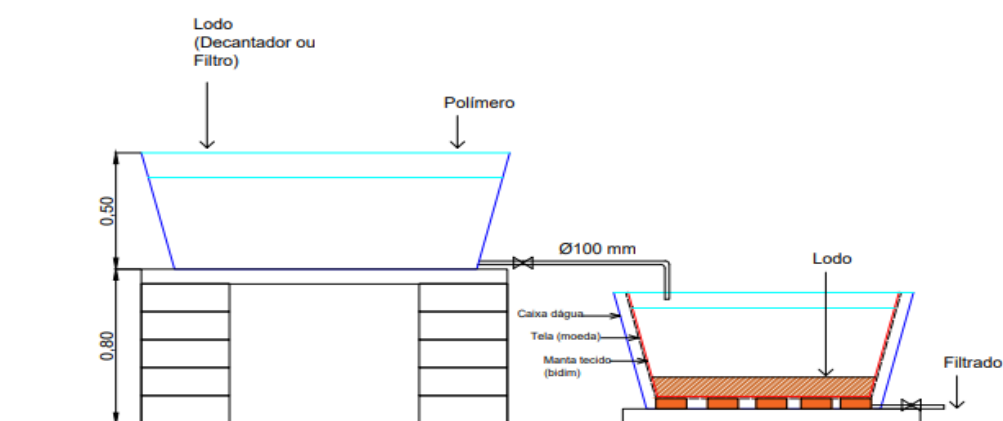
4.4 ETAPA III: ESTAÇÃO PILOTO PARA DESAGUAMENTO DO LODO EM MANTA GEOTÊXTIL

A estação piloto foi montada nas dependências da ETA municipal de Araguatins, consistindo dos seguintes itens:

- ✓ Dois reservatórios de polietileno em formato circular com altura de 50 cm, diâmetro de 1,03 m e volume de 250 L;
- ✓ Um suporte de ferro do tipo moeda em formato circular, com altura de 37 cm e 78 cm de diâmetro;
- ✓ 100 m² do tecido geotêxtil;
- ✓ Um palete de madeira, com 80 cm de altura;
- ✓ Um palete de madeira, com 30 cm de altura;
- ✓ Um cano com 1,5 m de comprimento, com 50 mm de diâmetro;
- ✓ Um cano com 0,8 m de comprimento, com 50 mm de diâmetro;
- ✓ Dois registros de 50 mm de diâmetro;
- ✓ 1 Recipiente graduado de 20 L.

As Figuras 21 e 22 apresentam, respectivamente, o projeto da estação piloto e a estação montada na ETA de Araguatins – TO.

Figura 21 Projeto da estação piloto



Fonte: Autor, 2024

Figura 22 Estação piloto instalada na ETA municipal de Araguatins - TO



Fonte: Autor, 2024

A partir dos resultados obtidos nos ensaios em bancada, foram escolhidas a melhor dosagem do condicionante químico através do IVL e a melhor taxa de desaguamento.

Optou-se neste estudo a realização dos experimentos de campo com as duas concentrações de lodo disponíveis, utilizando a dosagem de polímero que apresentou o menor IVL para cada uma das amostras.

Levando em conta a carga hidráulica e mantendo a altura da *filter cake* (H_t) dos ensaios de desaguamento em bancada, houve o processo de extrapolação dos dados usados e dos resultados obtidos nos ensaios de desaguamento em bancada para a estação piloto.

Na estação piloto, foram realizados 6 ensaios, sendo divididos de acordo com o Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 Ensaios realizados na estação piloto

Ensaio	Concentração do lodo (g/L SST)
1	15,20
2	15,20
3	15,20
4	22,03
5	22,03
6	22,03

Fonte: Autor, 2024

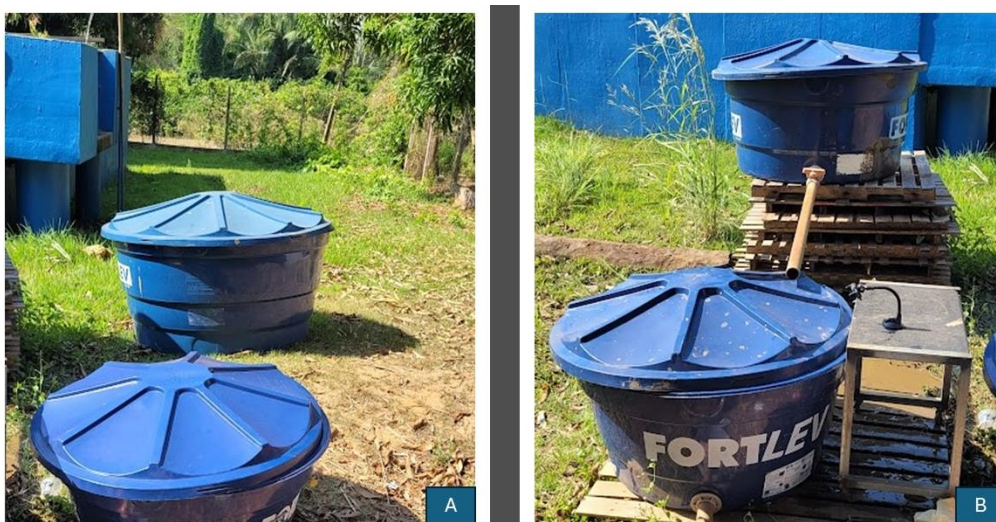
Para o cálculo da dosagem do volume da solução de polímero na estação piloto, será usada a mesma equação dos ensaios de desaguamento em bancada (Equação 4), apenas extrapolando os volumes de lodo e da solução de polímero obtidos nos ensaios em bancada.

4.4.3 Operação da Unidade Piloto para Desaguamento do Lodo de ETA

Uma vez definido o melhor polímero e com os resultados dos ensaios de filtração em manta geotêxtil, foram realizados nesta etapa os ensaios na instalação piloto. O objetivo desta fase é avaliar se o tecido geotêxtil é eficiente como meio filtrante do lodo gerado no decantador da ETA de Araguatins.

Para cada ensaio, foram preparados dois reservatórios do resíduo base: um para o lodo de concentração 15,20 g/L SST com 77,5 L, e outro para o lodo de concentração 22,03 g/L SST, com 162 L do resíduo. Do reservatório, o resíduo base foi transferido para o reservatório principal, de onde foi despejado, via tubulação, para o reservatório de desaguamento. As Figuras 23 apresenta os reservatórios do resíduo base, principal e de desaguamento.

Figura 23 Reservatórios de resíduo base (A) e recipientes principal e de filtração (B)



Fonte: Autor, 2024

Ao resíduo base já presente no reservatório principal, adicionou-se a dosagem de polímero, seguida de agitação por 1 minuto com o auxílio agitador mecânico portátil (Figura 27).

Após a estabilidade da mistura, procedeu-se à abertura do registro do primeiro reservatório, permitindo que o resíduo, por gravidade, fosse despejado no reservatório de experimento, este já com a estrutura de ferro revertida pela manta geotêxtil. A Figura 24 ilustra a parte interna do reservatório de filtração sem e com a manta geotêxtil.

Com o reservatório de experimento já preenchido com todo o lodo, foi aberto o registro para a drenagem do resíduo filtrado pelo geotêxtil, e assim coletando o filtrado em recipiente graduado. Essas coletas foram realizadas a cada minuto, sendo observado se o geotêxtil mantinha a integridade, sem rasgos, cortes ou rupturas. Após o término da drenagem, a porção sólida do lodo foi coletada para análise da rotina de sólidos.

Figura 24 Parte interna do reservatório de desaguamento



Fonte: Autor, 2024

Figura 25 Agitação do lodo



Fonte: Autor, 2024

4.4.4 Avaliação do Desaguamento do Lodo na Estação Piloto

Como resposta do experimento, serão analisados os parâmetros da parte sólida do resíduo retido pelo tecido geotêxtil e do filtrado coletado após o processo de desaguamento (Tominaga, 2010).

Os Quadros 12 e 13 respectivamente apresentam os parâmetros analisados após o processo de desaguamento na estação piloto.

Quadro 12 Parâmetros de análise do filtrado após o processo de desaguamento

Parâmetro	Unidade
Turbidez	uT
Sólidos Totais	mg/L
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L
Sólidos Suspensos Totais	mg/L

Fonte: Autor (2024)

Quadro 13 Parâmetros de análise do sólido retido na manta no sistema de desaguamento

Parâmetro	Unidade
Eficiência de filtração	%
Teor de sólidos	%
Sólidos suspensos totais	g/L
Porcentagem de desaguamento	%
Umidade	%

Fonte: Autor, 2024

Além dos parâmetros citados anteriormente, também foram analisados a eficiência de filtração (EF), o percentual de desaguamento (PD) e a velocidade de sedimentação em cm/min.

A eficiência de filtração (EF) é a capacidade do tecido geotêxtil reter sólidos, sendo o resultado da sua capacidade em filtrar água. Seu valor é determinado pela seguinte Equação 7 (Moo-Young e Trucker, 2002):

$$EF(\%) = \frac{ST_{inicial} - ST_{final}}{ST_{inicial}} \times 100 \quad (7)$$

Onde EF é a eficiência de filtração; $ST_{inicial}$ é o valor de sólidos totais iniciais do resíduo antes de ser filtrado em mg/L; ST_{final} é o valor de sólidos totais no efluente em mg/L obtido por secagem.

A porcentagem de desaguamento (PD) é a diferença percentual entre o sólido inicial ($PS_{inicial}$) e o final (PS_{final}) em relação à porcentagem inicial dos sólidos calculada a partir da Equação 8 (Silva, 2019):

$$PD(\%) = \frac{PS_{inicial} - PS_{final}}{PS_{inicial}} \times 100 \quad (8)$$

Onde $PS_{inicial}$ é porcentagem dos sólidos iniciais do resíduo e PS_{final} é a porcentagem dos sólidos final do resíduo.

A velocidade de sedimentação é determinada pela altura da *filter cake* (H_t), sendo medida a partir do início da rodada do experimento. É uma medida importante pois permite verificar pelo tempo em minutos, a diminuição da altura da *filter cake* e o poder de desaguamento da manta geotêxtil, sendo calculada através da Equação 9 a seguir.

$$V_s = \frac{H_f - H_i}{T_f} \quad (9)$$

Onde H_f a altura final da *filter cake* ao fim da rodada, em cm; H_i é a altura inicial da *filter cake* no início da rodada, em cm; T_f é o tempo ao fim da rodada, em min e V_s a velocidade de sedimentação em cm/min.

Também foi analisado o teor de umidade do resíduo retido na manta geotêxtil através de uma balança determinadora de umidade. O modelo de balança utilizado é um “Medidor de Umidade ID200”. Segundo o manual de instruções do equipamento, “a balança possui como fonte de calor infravermelho produzido por resistência encapsulada em quartzo e display LCD matriz de pontos iluminados.” As características do equipamento são apresentadas na Tabela 13 a seguir.

Tabela 13 Dados Técnicos do equipamento "Medidor de Umidade ID200"

Características	Especificidade
Carga máxima (g)	210
Sensibilidade (g)	0,01
Reprodutibilidade (g)	0,01
Campo de tara (g)	210
Faixa de temperatura (°C)	60 a 180
Incremento de Temperatura (°C)	1
Faixa de umidade (%)	0 a 100
Tempo de estabilização (s)	3
Potência do resistor (W)	250
Diâmetro do prato (mm)	90
Continuação	
Características	Especificidade
Dimensões da balança CxLxA (mm)	292x210x190
Peso (kg)	6,4
Voltagem (V)	220
Consumo (W)	7

Fonte: Manual de instruções do equipamento

Para a medição da umidade, foi usada a função “auto” presente no equipamento. Nessa função, a secagem é realizada a uma temperatura fixa e o processo cessará quando a variação do peso no intervalo de 30 segundos for menor que um valor estabelecido em %. Para o experimento de determinação da umidade deste trabalho, foram usados os parâmetros determinados por Frata (2019), onde a temperatura fixada para secagem foi de 180 °C e a % de variação de 0,05%.

Ao fim do procedimento, o equipamento apresentou os resultados da umidade através o percentual relativo ao peso inicial.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e as discussões obtidos, sendo apresentados no item 5.1 a caracterização da área de estudo, abrangendo o município de Araguatins e a Estação de Tratamento de Água Municipal; o item 5.2, os ensaios de adensamento em bancada; seguidos no item 5.3 dos ensaios de desaguamento em bancada e por fim, os ensaios da instalação piloto com a manta geotêxtil no item 5.4.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

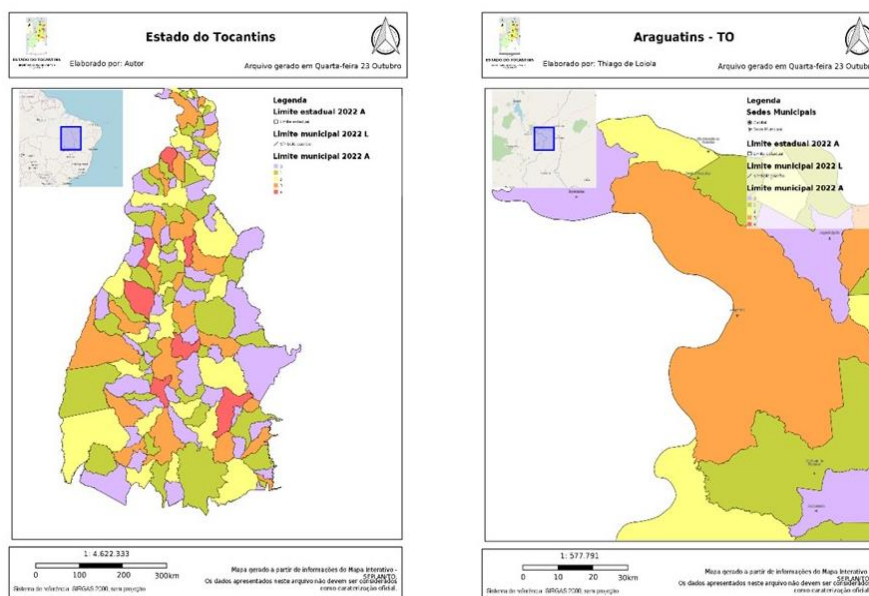
O Município de Araguatins, como os demais municípios do antigo norte do estado de Goiás, era abastecido pela Companhia de Saneamento de Goiás - SANEAGO. Após a criação do Estado do Tocantins e o consequente desmembramento da Companhia de Saneamento de Goiás – SANEAGO, foi criada a SANEATINS - Companhia de Saneamento do Tocantins, de domínio do estado, porém com o objetivo de desenvolver os serviços de saneamento do Tocantins. A partir de então, a SANEATINS ficou com a concessão do sistema de abastecimento de água (SAA) de Araguatins até ano de 1999, ano em que a Prefeitura Municipal criou uma autarquia municipal – Serviço Municipal de Saneamento Básico (SEMUSA) e passou a operar o SAA, permanecendo até os dias atuais.

Com uma população de 31.918 habitantes (IBGE, 2022), o município de Araguatins localiza-se no extremo norte do Estado, em uma macrorregião conhecida como Bico do Papagaio, na mesorregião ocidental do Tocantins. A Figura 28 apresenta a localização do município.

Distante 620 km da capital Palmas, ocupa uma área de 2.633,278 km², situado a uma altitude de 122 m em relação ao nível do mar, sendo margeado pelo Rio Araguaia. Apresenta dois ecossistemas - Floresta Amazônica e o Cerrado Sentido Restrito – portanto, está localizado em uma região *ecotonal* (Seplan, 2004). A Figura 26 apresenta a localização do município com relação ao estado do Tocantins.

Quanto às coordenadas geográficas, Araguatins está localizada na latitude 5°38'54" (S) e longitude 48°7'30" (O) (Seplan, 2004).

Figura 26 Localização do município de Araguatins - TO



Fonte: Seplan - TO (2022)

A cidade é cortada em seu perímetro urbano por três corpos hídricos (Figura 29): o Rio Taquari, único corpo hídrico onde é realizada a captação de água da cidade; o Rio Araguaia, utilizado principalmente como meio de transporte das comunidades ribeirinhas da região; e o Córrego Brejinho, de menor porte, sendo utilizado como lazer pela população que margeia o rio.

Figura 27 Corpos hídricos no município de Araguatins - TO



Fonte: Google Earth (2024)

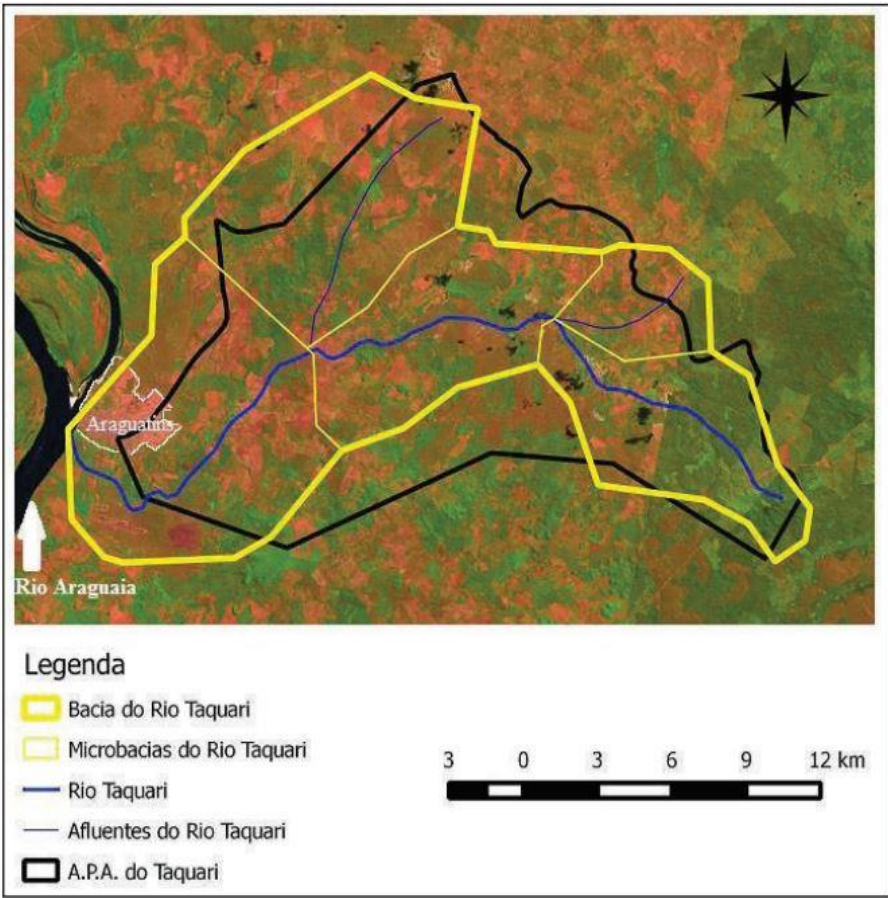
O rio Taquari é responsável pelo abastecimento público da cidade de Araguatins – TO, além do fornecimento de água para as atividades agropecuárias que são a base da economia regional. Possui dois contribuintes ao longo do seu percurso – os riachos Água Rocha e Ribeirão da Mata – aumentando o seu potencial hídrico. O Quadro 13 apresenta as características do Rio Taquari e a Figura 28 apresenta um mapa da Bacia do Rio Taquari.

Quadro 13 Características do Rio Taquari

Rio Taquari	
Área da Bacia Hidrográfica	28579,7000 ha
Perímetro	91,75 km
Comprimento	40 km
Altura máxima	120 m ao nível do mar
Comprimento Riacho Água Rocha	10,9 km
Comprimento Riacho Ribeirão da Mata	6,05 km

Fonte: Seplan, 2022

Figura 28 Bacia do Rio Taquari e microbacias

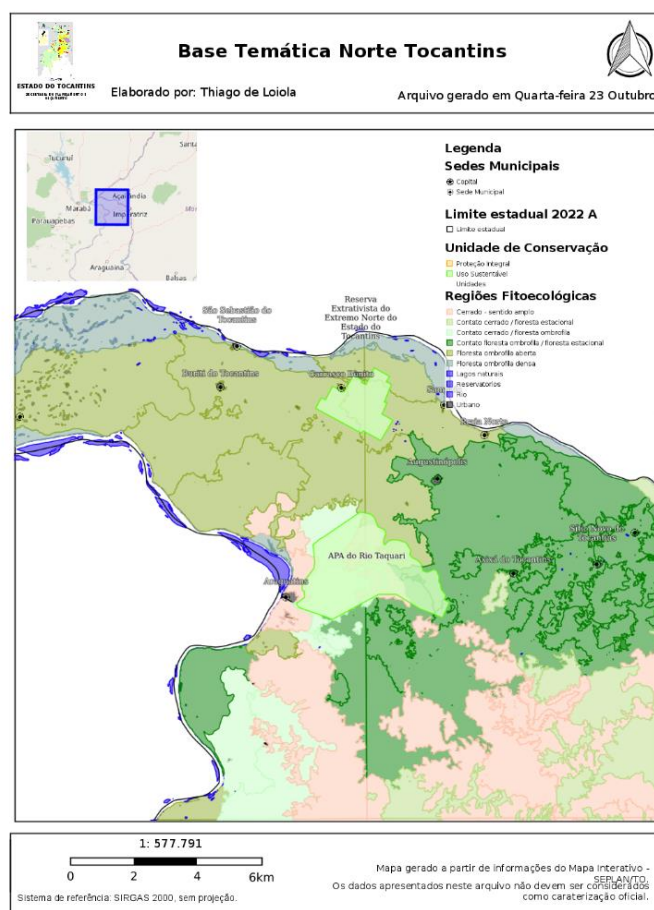


Fonte: IMAGEM LANDSAT_5_TM; ORBITA: 223; PONTO: 064; BANDAS: 3/4/5 Data 20/10/2024

Apesar de margear e ter sua foz na zona urbana de Araguatins, o Rio Taquari tem sua nascente no povoado Boa Sorte, pertencente ao município de Axixá – TO, distante cerca de 60 km de Araguatins; e sua foz é na zona urbana de Araguatins, desembocando no Rio Araguaia.

Merece destaque a presença da Área de Preservação Ambiental – APA do Taquari, Unidade de Conservação em que o Rio Taquari está presente (Figura 29). Criada a partir da Lei Estadual nº 806/2002 de 20/12/2002, tendo como base a Lei Federal nº 9.985 de 18 de julho de 2000, possui um total de 26.152 ha², ocupa 0,09% da área do estado e 0,62% das áreas das unidades de conservação do estado do Tocantins (Tocantins, 2012).

Figura 29 Área de Proteção Ambiental do Rio Taquari - APA Taquari



Fonte: SEPLAN - TO, 2024

Para a caracterização do corpo hídrico quanto à sua hierarquização, foi usado o método de Horton - Strahler (1957), que determina a classificação dos corpos hídricos

pelo número de contribuintes a este da seguinte forma: corpos hídricos de primeira ordem estão ligados diretamente à nascente; já os de segunda ordem são resultados da confluência de dois de primeira ordem, só recebendo água de contribuintes de primeira ordem; os de terceira ordem são resultados da confluência de dois de segunda ordem, recebendo contribuintes de ordens inferiores (Manoel e Rocha, 2014), e assim sucessivamente. Sob esta ótica, o Rio Taquari é classificado como de 3ª ordem, com identificação de bacia com densidade de drenagem esparsa.

Com um IDH de 0,631 (IBGE, 2022), considerado médio, a população, em sua grande maioria, é dependente de programas sociais. Ainda, o município não possui um parque industrial ou grandes empresas, sendo a principal atividade econômica a agropecuária e o agronegócio. A Tabela 14 a seguir apresenta os dados socioeconômicos do Município de Araguatins – TO.

Tabela 14 Aspectos socioeconômicos do Município de Araguatins - TO

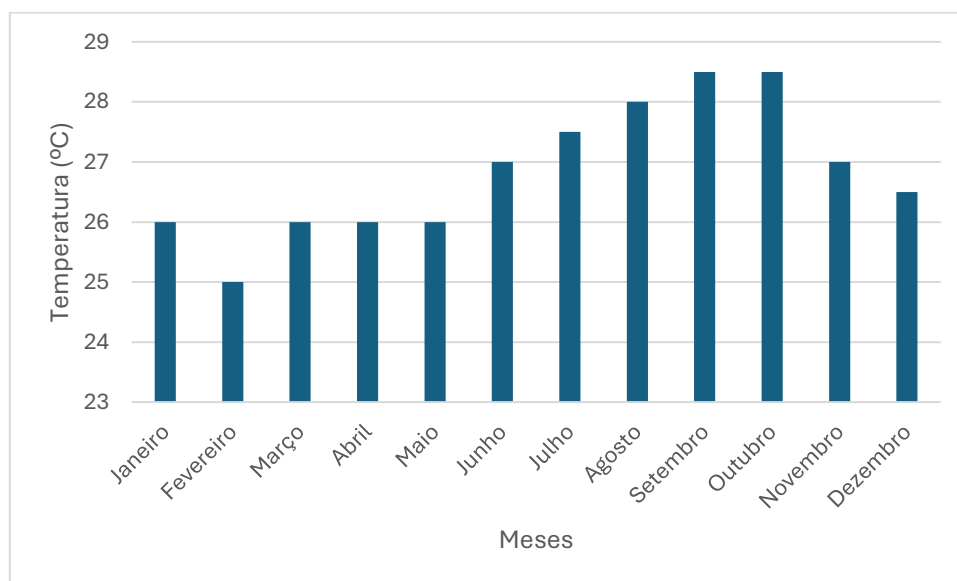
Trabalho e rendimento			
Salário médio mensal dos trabalhadores formais (R\$)	Pessoal ocupado	População ocupada (%)	População com rendimento mensal per capita de até 1/2 salário-mínimo (R\$)
1,7	2.926	9,17	46,1
Economia			
PIB per capita (R\$)		Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM)	
14.472,16		0,631	
Saúde			
Mortalidade Infantil óbitos/1000 nascidos vivos	Internações por diarreia pelo SUS	Estabelecimentos de Saúde SUS	
16,91	90,9	9	
Saneamento básico			
Esgotamento sanitário (% atendida)	Hidrometração (%)	Perdas de distribuição de água (%)	Cobertura na coleta de resíduos sólidos (%)
1,8	64,92	70,46	68,93

Fonte: IBGE (2022)

As informações apresentadas mostram que a população municipal é carente de serviços básicos, principalmente os serviços de saneamento. Ainda, o percentual de pessoas desocupadas é elevado, mostrando um baixo poder aquisitivo *per capita*. Por este prisma, ofertar produtos e serviços públicos com um preço mais elevado se torna inviável. O baixo salário médio por trabalhador e a renda média mensal de ½ salário-mínimo corroboram essa informação.

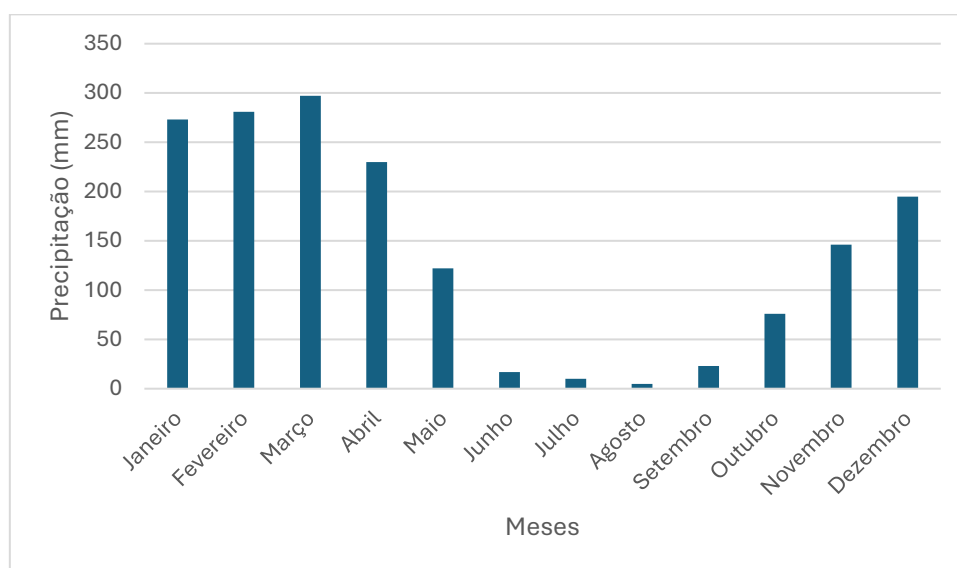
A partir da análise climatológica de Araguatins, o município possui temperatura mínima anual média de 22°C, onde no mês de julho são registrados os menores valores mensais, entre 18°C e 19°C. Sua temperatura máxima anual fica próximo aos 33°C, chegando aos 35°C entre os meses de agosto e setembro (SEPLAN, 2014). Na classificação climática de THORNTHWAITTE, está categorizado como úmido com moderada deficiência hídrica (Roldão, 2019). Ainda segundo o autor, a precipitação média está em 1500mm ao ano. As Figuras 30 e 31 apresentam, respectivamente, a média das temperaturas mensais e o índice pluviométrico em Araguatins – TO no ano de 2023.

Figura 30 Temperatura média por mês no município de Araguatins - TO no ano de 2023



Fonte: CLIMATEMPO, 2023

Figura 31 Índice pluviométrico por mês no município de Araguatins - TO no ano de 2023



Fonte: CLIMATEMPO, 2023

5.1.1 Sistema de Abastecimento de Água do Município de Araguatins- TO

O SAA de Araguatins é composto por captação superficial, seguido de tratamento e armazenamento em reservatórios para distribuição. Os seguintes processos e estruturas fazem parte do SAA:

- ✓ Captação superficial;
- ✓ Estação de tratamento de água;
- ✓ Estações Elevatórias;
- ✓ Adutoras;
- ✓ Reservatórios;
- ✓ Rede de Distribuição

a) Captação superficial da água bruta

A captação do SAA é feita por meio de poço de sucção através de uma bomba principal para transferir a água bruta até a ETA (caso haja uma falha, pode-se usar uma bomba reserva com a mesma potência). A Tabela 15 abaixo apresenta os dados da captação superficial, e a Figura 32, o sistema de captação.

Tabela 15 Características da bomba de sucção da ETA de Araguatins

Captação	Vazão (m³/h)	Tipo	Localização
Superficial	360	Balsa Flutuante	Rio Taquari (5°40'03.04" S) (48°06'22.91" O)

Fonte: SEMUSA, 2024

Figura 32 Bomba de sucção da água bruta



Fonte: Autor (2024)

b) Estação de tratamento de água

A ETA de Araguatins adota a tecnologia do Ciclo Completo em concreto armado e opera atualmente com uma vazão informada de 360 m³/h. No Quadro 14 são apresentadas as unidades presentes na ETA. Já a Figura 33, apresenta uma visão aérea da estação.

Quadro 14 Unidades da ETA de Araguatins

Estrutura	Tipo
Unidade de mistura rápida	Calha Parshall
Unidade de floculação	Escoamento vertical
Unidades de decantação	Decantadores de alta taxa
Unidade de filtração	Filtros descendente com Areia

Fonte: Autor, 2024

Figura 33 Imagem aérea da ETA de Araguatins



Fonte: Autor, 2024

c) Casa de química

A ETA possui uma casa de química (Figura 34) para preparação e dosagem de produtos químicos. Para o tratamento de água, os produtos usados são a Cal Hidratada Ca(OH)_2 , Hipoclorito de Sódio (NaClO) e Sulfato de Alumínio Ferroso $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{FeSO}_4$, este como coagulante através de uma calha Parshall.

Figura 34 Casa de química



Fonte: Autor, 2024

d) Estações elevatórias

A ETA possui 4 estações elevatórias, descritas na Tabela 16, em operação: além da elevatória de água bruta na captação superficial, existe a elevatória de água tratada 1 (Figura 35), ligando o tanque de contato da ETA até o reservatório apoiado 1 (RAP 1); a elevatória de água tratada 2 que interliga o RAP 1 até o reservatório elevado 1 (REL 1); e elevatória de água tratada 3 que interliga o RAP 1 até o reservatório elevado 2 (REL 2).

Tabela 16 Estações elevatórias da ETA de Araguatins

Instalação	Tipo	Destino	Vazão (m³/h)	Potência	Marca/modelo
Captação	Água bruta	ETA	360	50	KSB ²
Tanque de contato	Água tratada	RAP 1	300	60	KSB
Centro de reservação 01	Água tratada	REL 1	100	30	KSB
Centro de reservação 02	Água tratada	REL 2	50	20	KSB

Fonte: Plano Municipal de Saneamento de Araguatins (2020)

Figura 35 Estação elevatória de água tratada no SAA de Araguatins



Fonte: Autor (2024)

² *KSB SE & Co.©

e) Floculador

A floculação é realizada por meio de um floculador hidráulico (Figura 36) com chicanas de fluxo vertical que alimenta os decantadores, apresentando as seguintes dimensões:

- ✓ Base quadrada em planta, com 6 m em cada lado;
- ✓ Profundidade de 3,5 m;
- ✓ Volume útil 126 m³;
- ✓ Gradiente de velocidade 15 a 40 s⁻¹

Figura 36 Floculador da ETA



Fonte: Autor (2024)

f) Decantador de alta taxa

Na ETA municipal de Araguatins existem dois decantadores do tipo alta taxa (Figura 37) com escoamento horizontal e taxa de fluxo vertical com módulos tubulares de decantação. De acordo com a SEMUSA, a taxa de decantação em ambos é de 119 m³.m⁻².d⁻¹ e os resíduos gerados são removidos de forma manual quinzenalmente.

As unidades são iguais em tamanho e volume água tratada. As características dos decantadores são apresentadas abaixo:

- ✓ comprimento útil de 11,0 m;
- ✓ profundidade útil de 3,5 m;
- ✓ largura de 6,0 m;
- ✓ área em planta de 90,0 m²;
- ✓ volume útil por decantador de 231,0 m³;
- ✓ taxa de decantação é igual a 119,0 m³.m⁻².d⁻¹;

Figura 37 Decantadores da ETA



Fonte: Autor (2024)

g) Filtros de areia

Após a decantação, tem-se o sistema de filtração, com cinco filtros rápidos descendentes, possuindo uma camada areia, uma de cascalho grosso e outra com cascalho fino (SEMUSA, 2023), com 50 cm cada camada. O sistema de filtração possui uma entrada de água decantada, saída de água de lavagem e saída de água filtrada. O sistema de lavagem é do tipo autolavável, substituindo o sistema anterior, por bombeamento. Nas palavras de Silva *et al* (2014), o sistema de lavagem por bombeamento proporciona um ganho operacional na ETA, pois prolonga as carreiras de filtração, e não se deixa de produzir água tratada no momento da lavagem, como é o caso do sistema autolavável. Os filtros são ilustrados na Figura 38.

Figura 38 Filtros da ETA



Fonte: Autor, 2024

h) Adutoras

As adutoras de água tratada (AAT) que compõem o SAA do município tem a função de transportar água tratada da ETA até os reservatórios e redes de distribuição. O sistema é composto por uma adutora de água bruta (AAB 001) e duas adutoras de água tratada (AAT 001 e 002), que interligam desde a captação até todos os reservatórios da cidade. As características das adutoras são apresentadas no Quadro 22.

Tabela 17 Adutoras da ETA de Araguatins

Adutora	Trecho	Material/diâmetro	Extensão (m)
AAB 001	Captação - ETA	FoFo - DN 300	200
AAT 001	ETA – RAP 1	DeFoFo – DN 300	1200
AAT 002	RAP 1 – REL 2	PVC – DN 100	870

Fonte: adaptado do Plano de Municipal de Saneamento Básico de Araguatins

i) Reservatórios

O SAA de Araguatins é composto por 06 reservatórios (Tabela 18) que recebem água tratada da ETA e conseguem abastecer toda área urbana do município por gravidade.

Tabela 18 Reservatórios de água tratada de Araguatins - TO

Reservatório	Capacidade (m³)	Tipo	Material	Função Principal
RAP 01	2000	Apoiado	Concreto	Armazenamento e distribuição
RAP 02	200	Apoiado	Metálico	Armazenamento e distribuição
RAP 03	300	Apoiado	Concreto	Armazenamento e distribuição
RAP 04	500	Apoiado	Metálico	Armazenamento e distribuição
REL 01	150	Elevado	Concreto	Armazenamento e distribuição
REL 02	30	Elevado	Metálico	Armazenamento e distribuição
Total	3180			

Fonte: adaptado do Plano de Municipal de Saneamento Básico de Araguatins

Por questão de importância e forma do sistema de distribuição da água, optou-se para caracterizar o sistema de reservação, dividir em dois centros – centro de armazenamento e distribuição 1 e centro de armazenamento de distribuição 2, contemplando todos os reservatórios da cidade.

j) Centro de armazenamento e distribuição 1

Neste centro de reservação estão localizados três reservatórios apoiados e um reservatório elevado. O reservatório apoiado 01 (RAP 01), construído em concreto, localizado na cota 86,6, com 2.000 m³ de capacidade, funciona como reservatório distribuidor para todo o sistema (Figura 38). Deste reservatório saem as tubulações que abastecem por gravidade os outros dois reservatórios apoiados pertencentes ao centro de reservação, o reservatório apoiado 02 (RAP 02) com 200 m³ e reservatório apoiado 03 (RAP 03) com 300 m³. Os dois reservatórios servem como poço de sucção para as elevatórias que recalcam respectivamente para o reservatório elevado 01 (REL 01) (Figura 39) e para o Centro armazenamento e distribuição 2, localizado na cota 101, além de atenderem a rede de distribuição. Do RAP 03, de 300 m³ sai uma tubulação de 150 mm de ferro fundido que atende a zona de cota intermediária localizada antes da Rodovia Transamazônica que corta a cidade, também chamada de Avenida Araguaia, no trecho dentro do perímetro urbano.

A partir RAP 02, têm-se uma tubulação de 200 mm de Policloreto de Vinila (PVC) que atende a zona baixa localizada a jusante da rodovia.

O REL 01 atende às áreas localizadas na zona alta próxima ao Centro de Reservação. Em cada uma dessas zonas, (baixa, intermediária e alta), existe um anel de rede primária. Entretanto, eles não se constituem em zonas piezométricas para equilíbrio de pressão no sistema, como seria de se supor. As redes estão interligadas, formando uma zona de pressão única que abrange toda a cidade e os dois centros de reservação.

Figura 39 Reservatório Elevado 01



Fonte: Autor, 2024

k) Centro de armazenamento e distribuição 2

Este centro de reservação, localizado em cota mais alta que o Centro de armazenamento e distribuição 1, atende à aproximadamente à metade da cidade. Nele estão localizados um reservatório apoiado de 500 m³ de capacidade, o reservatório apoiado 04 (RAP 04), e um reservatório elevado de 30 m³ para atendimento do entorno. Também este centro de reservação, distribui para uma rede onde existe um anel de rede primária, mas também se encontra interligado, não constituindo uma zona de pressão (Figura 40).

Figura 40 Centro de armazenamento e distribuição 2



Fonte: Autor, 2024

1) Rede de distribuição

A distribuição de água para a cidade é realizada através de adutoras e redes secundárias com diâmetros menores. As redes de distribuição de Araguatins são constituídas de tubos em PVC PBA. Segue na Tabela 19 a seguir as descrições das redes com seus respectivos diâmetros e extensões.

Tabela 19 Rede de distribuição da cidade de Araguatins

Diâmetro (mm)	Extensão (m)	Material
50	70.276	PVC PBA
75	1.817	PVC PBA
100	863	PVC PBA
Total	72.956 m	

Fonte: Adaptado do Plano de Municipal de Saneamento Básico de Araguatins

Segundo dados do SNIS (2021), a área urbana do município possui aproximadamente 7.736 ligações de água ativas. Ainda através de consulta no SNIS, houve uma evolução no número de ligações de água na zona urbana da cidade entre os

anos de 2016 e 2021. Os dados sobre o número de ligações nos últimos anos são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 Número de ligações de água em Araguatins de 2016 a 2021

Tipo de ligação	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Ligação urbana	6.877	7.369	7.438	7.369	7.438	7.736

Fonte: SNIS (2021)

5.1.2 Caracterização do Manancial e do Lodo

5.1.2.1 Caracterização da água bruta

Como citado no capítulo metodológico, foram realizadas cinco coletas para caracterização da água bruta ao longo da pesquisa, divididas em período chuvoso (novembro de 2023, abril de 2024) e seco (maio, junho e julho de 2024). Na Tabela 21 a seguir são apresentados os resultados da média e desvio padrão dos resultados obtidos nas coletas. Os resultados das análises são apresentados nos anexos deste trabalho.

Tabela 21 Parâmetros de caracterização da água bruta

Parâmetro	Unidade	Média e Desvio padrão
pH	-	6,67 ± 0,12
Turbidez	uT	7,89 ± 3,97
DQO	mg/L	16
COT	mg/L C	1,673 ± 0,231
Ferro	mg/L Fe	0,48 ± 0,23
Alumínio	mg/L Al	<0,1
Cor aparente	uH	45

Fonte: Autor, 2024

Tomando-se por base a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005, padrão para águas doces de Classe 2, nos resultados obtidos para a água bruta, apenas o padrão Ferro ficou acima do preconizado pela legislação (0,3 mg/L Fe).

5.1.2.2 Caracterização do lodo da ETA Araguatins

Para a realização deste trabalho, foram realizadas duas coletas de resíduos no fundo do decantador da ETA de Araguatins. As coletas foram realizadas em períodos distintos, sendo uma no período seco (15/10/2023) e outra no período chuvoso (05/01/2024), objetivando verificar a influência desses períodos na composição do resíduo. Ambas possuem semelhança, destacando-se a quantidade de sólidos em cada uma das amostras. A Tabela 22 apresenta os resultados dos parâmetros físicos – químicos do lodo coletado nos dois períodos estudados.

Tabela 22 Parâmetros de caracterização físico-química do lodo amostra período seco e chuvoso

Parâmetro	Unidade	Resultado período seco (15/10/2023)	Resultado período chuvoso (05/01/2024)
pH	-	6,36	7,31
DQO	mg/L	2370	2720
COT	mg/L C	279	321
Ferro	mg/L Fe	1615	1857,25
Alumínio	mg/L Al	6,00	6,90
Sólidos totais	g/L	16,95	24,34
Sólidos dissolvidos totais	g/L	1,75	2,31
Sólidos suspensos totais	g/L	15,20	22,03
Umidade	%	89,90	92,33
Turbidez	uT	>1000	>1000

Fonte: Autor, 2024

Quanto à caracterização do lodo, a presença de alumínio já era esperada, visto que o sulfato de alumínio ferroso - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{FeSO}_4$ é a substância utilizada como coagulante no tratamento da água bruta. O valor encontrado de ferro está fora estabelecido pela Resolução NBR 10004, tendo seu limite estabelecido em 0,3 mg/L. Isso é devido ao coagulante a base de ferro usado no tratamento de água bruta.

O valor da DQO está acima do preconizado diversos autores e trabalhos encontrados na literatura. Uma das hipóteses a ser considerada para essa situação é o lançamento, sem tratamento, do lodo diretamente no corpo hídrico da captação de água, gerando uma recirculação desse material, contribuindo para o valor elevado deste

parâmetro. A Tabela 23 apresenta faixas de DQO (mg/L) citados por autores como adequadas para resíduos encontrados em decantadores de ETA (Ferreira, 2022).

Tabela 23 Valores de DQO (mg/L) para lodo de ETA preconizados por autores

Autor	DQO (mg/L)
Neubauer (1968)	500 – 15.000
Cordeiro (1993)	5.600
Richter (2001)	30 – 5.000
Souza e Almeida Filho (2017)	11.151

Fonte: Adaptado de Ferreira (2022)

Durante a realização deste trabalho, houve a estimativa da produção de lodo gerado a partir do tratamento da água. Para isto, foi usada a Equação 10 determinada pela American Water Work Association (AWWA, 1978)

$$P = 3,5 \times 10^{-3} \times Tu^{0,66} \quad (10)$$

Onde: P é produção de sólidos (kg de matéria seca/m³ de água bruta tratada) e Tu é a turbidez da água bruta (uT);

Para o cálculo, foi utilizado o valor médio da turbidez encontrado durante as duas coletas de água. Portanto, a partir da equação 10, tem que a produção de lodo da ETA em estudo durante o período da realização da pesquisa foi de 0,013682 de lodo/m³ de água bruta tratada.

5.2 ENSAIOS DE ADENSAMENTO DO LODO EM BANCADA

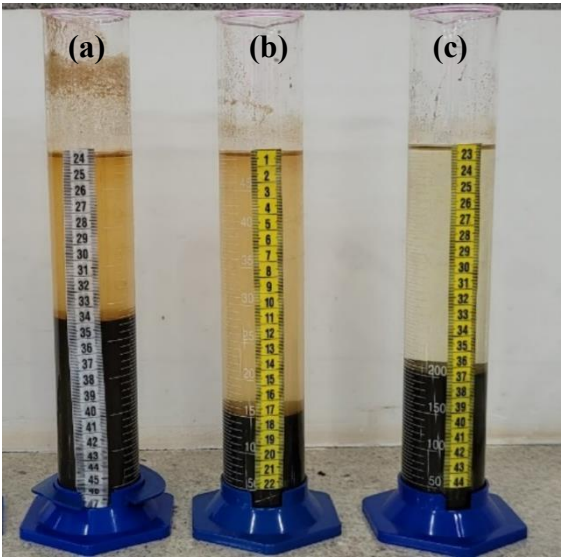
5.2.1 Ensaios de Adensamento com Lodo de Concentração 15,20 g/L SST

A Figura 41 apresenta um exemplo dos resultados de adensamento com cada um dos polímeros usados nos ensaios. As tabelas com a altura da interface em função do tempo encontram-se nos apêndices deste trabalho.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de adensamento de lodo com a concentração 15,20 g/L SST com os diferentes tipos e dosagens de polímero usados nos ensaios em bancada estão apresentados nas Figuras 42 a 44. Estes mostram a altura da

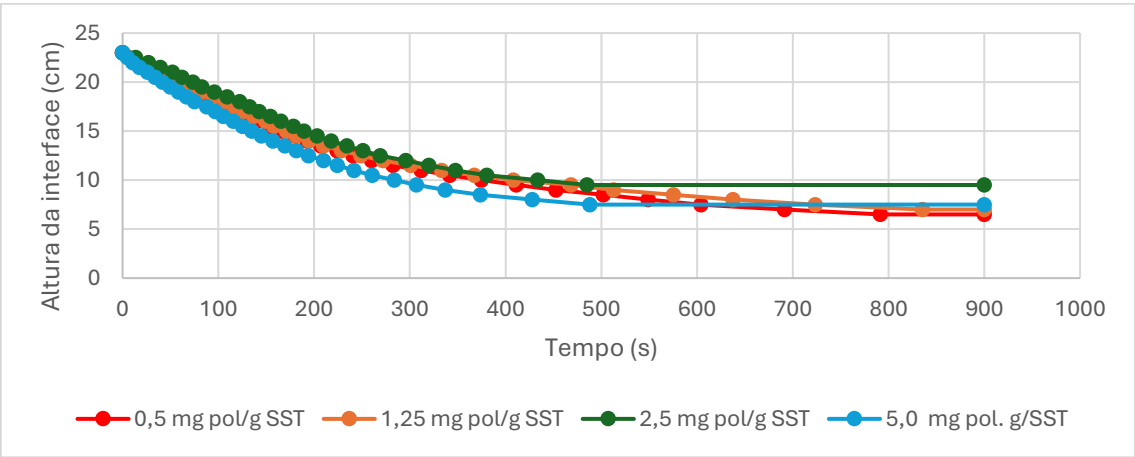
interface (cm) pela média dos tempos (s) obtidos em cada um dos ensaios em quintuplicada, representados pelas curvas de sedimentação. Optou-se por usar a média dos tempos de decantação uma vez que seria a melhor forma de interpretação dos dados.

Figura 41 Ensaios de adensamento do lodo de concentração 15,20 g/L SST: (a) Polímero não iônico, (b) aniônico e (c) catiônico



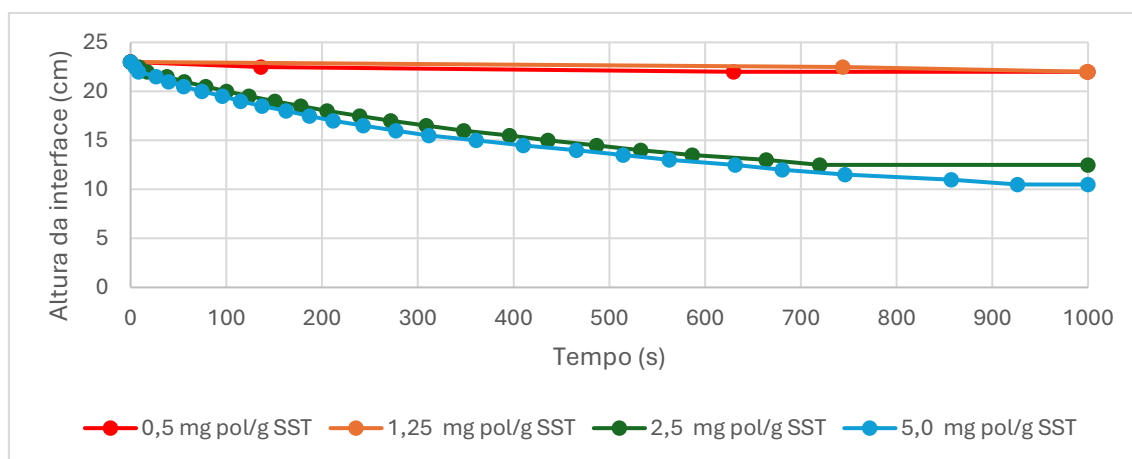
Fonte: Autor, 2024

Figura 42 Curvas de adensamento do lodo com concentração de 15,20 g/L SST com o uso do polímero aniônico



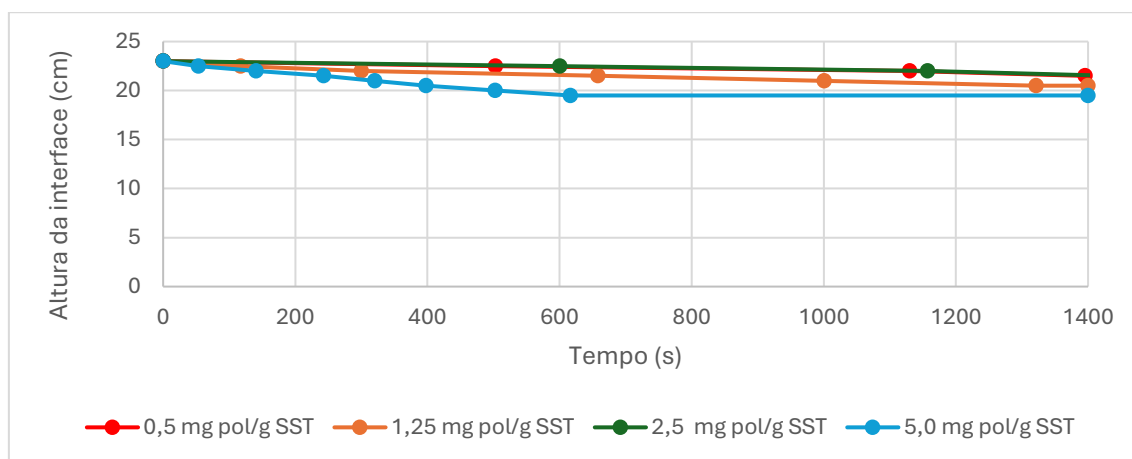
Fonte: Autor, 2024

Figura 43 Curvas de adensamento do lodo com concentração de 15,20 g/L SST com o uso do polímero não iônico



Fonte: Autor, 2024

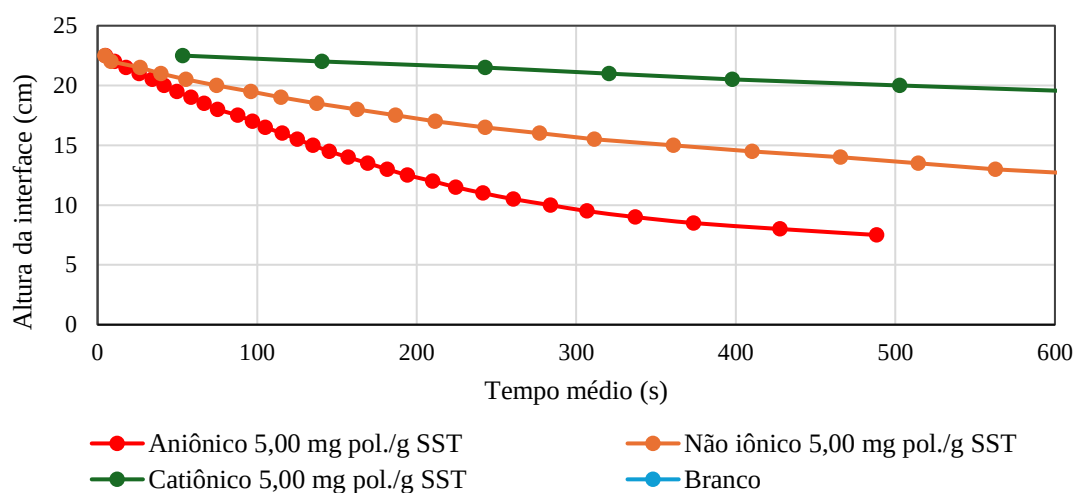
Figura 44 Curvas de adensamento do lodo com concentração de 15,20 g/L SST com o uso do polímero catiônico



Fonte: Autor, 2024

Com base nos resultados apresentados, o uso do polímero aniônico apresentou, na média, os menores tempos médios para as maiores sedimentações do lodo. Destaca-se os valores obtidos para a concentração de 5,00 mg pol./g SST em todos os ensaios. A Figura 45 apresenta as curvas de sedimentação para esta dosagem de polímero e a curva para a amostra em branco. Fica clara a diferença entre os resultados do uso dos polímeros nesta concentração de lodo, destacando-se o polímero aniônico. Ainda, a amostra em branco apresenta um baixo adensamento, mostrando a diferença quanto à presença do polímero.

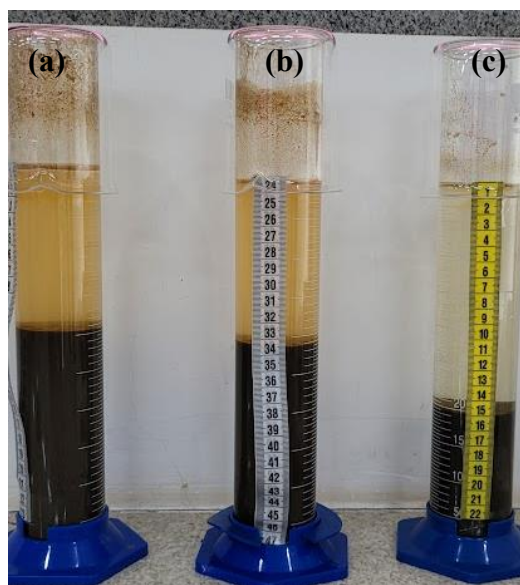
Figura 45 Melhores curvas de adensamento para o lodo de 15,20 g/L SST



Fonte: Autor, 2024

Mesmo o sobrenadante resultante do uso do polímero aniônico se mostrou mais clarificado nas provetas usadas no método, como pode ser observado na Figura 46.

Figura 46 Ensaios de adensamento em bancada do lodo de concentração 15,20 g/L SST: (a) Polímero não iônico, (b) aniônico e (c) catiônico



Fonte: Autor, 2024

Quanto ao sobrenadante obtido nos ensaios de adensamento com o lodo de 15,20 g/L SST, a Tabela 24 apresenta a média dos resultados obtidos para a série de sólidos e turbidez.

Tabela 24 Características do sobrenadante nos ensaios de adensamento do lodo de 15,20 g/L SST

Parâmetro	Unidade	Aniônico	Não iônico	Catiônico
Sólidos Totais	g/L	1,400	2,544	2,290
Sólidos Dissolvidos Totais	g/L	0,746	1,444	1,290
Sólidos suspensos totais	g/L	0,654	1,100	1,000
Turbidez	uT	62	75	74

Fonte: Autor, 2024

Em comparação com os valores de turbidez do resíduo antes do ensaio de adensamento (entre 990 e 1000 uT), os valores obtidos para o parâmetro turbidez no filtrado apresentam uma remoção acima de 90% para todas as amostras que foram submetidas ao ensaio de adensamento.

Ao analisar a Tabela 24 juntamente com os gráficos de adensamento, fica perceptível que o polímero aniônico se destacou entre os demais. Para este, a turbidez ficou em 62 uT, enquanto os polímeros não iônico e catiônico resultaram em 75 uT e 74 uT respectivamente. Silva (2017) em trabalho realizado abordando geotêxteis, em ensaios com lodo de concentração 15 g/L SST na dosagem de 5,00 mg polímero/g SST obteve resultados de turbidez de 26 uT a 106 uT após desaguamento do lodo.

Os resultados da série de sólidos do sobrenadante com a presença de polímero aniônico apresentou um resultado melhor do que os outros dois polímeros. Desta forma, os ensaios de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST foram mais eficientes com o uso do polímero aniônico, ainda com a concentração de 5,00 mg polímero/g SST destacando os resultados da série de solos, em alguns casos até quase duas vezes menor do que com o uso dos outros polímeros. Queiroz *et al.* (2019) em ensaios de adensamento com lodos de ETA, afirma que quanto maior a concentração inicial da amostra de lodo em SST, menores os valores de turbidez no filtrado. Lima (2016), Ismail *et al.* (2022) também corroboram ao encontram valores de turbidez no filtrado em ensaios de adensamento e ainda, segundo os autores, o valor da turbidez é menor quanto maior a dosagem do polímero utilizado.

Di Bernardo (2017) afirma que o uso de polímeros em estações de tratamento de água é importante para diminuir a turbidez dos resíduos porque eles atuam como agentes coagulantes e floculantes. Estes possuem a capacidade de atrair e agregar as partículas que causam e influenciam a turbidez na água (por partículas suspensas, como argila, matéria orgânica, e outros sólidos finos que não sedimentam facilmente), formando flocos

maiores e mais pesados que sedimentam mais rapidamente, facilitando a remoção no processo de decantação e filtração. Ainda segundo o autor, aqui estão os principais motivos pelos quais os polímeros são eficazes nesse contexto:

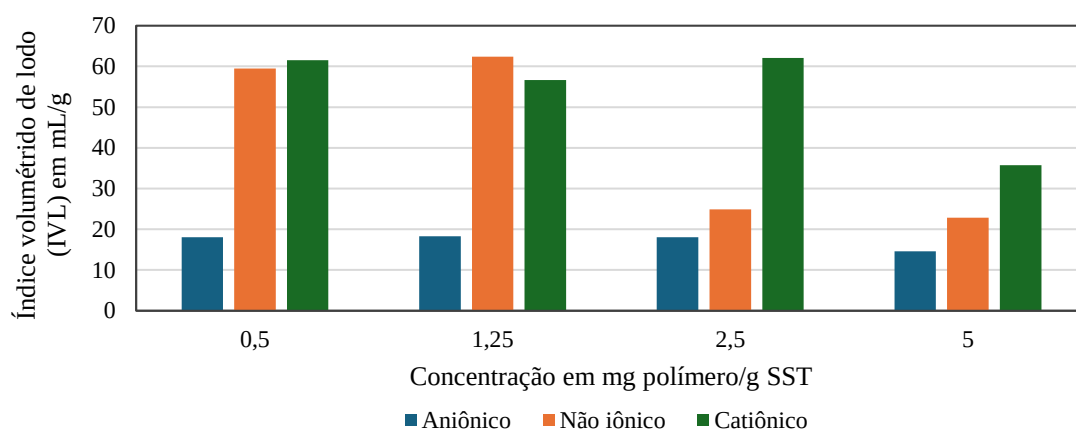
- ✓ Aglomeração de partículas: Polímeros, ao serem adicionados à água, ajudam a neutralizar as cargas das partículas suspensas, que geralmente possuem carga negativa e se repelem. Ao reduzir a repulsão, os polímeros favorecem a aglomeração dessas partículas.
- ✓ Formação de flocos maiores: Com a aglomeração promovida pelos polímeros, formam-se flocos maiores e mais densos, o que facilita a sedimentação dessas partículas. Isso diminui a turbidez da água de forma eficiente e acelera o processo de separação sólido-líquido.
- ✓ Maior eficiência no processo de clarificação: Com a adição de polímeros, o tratamento se torna mais eficiente, reduzindo o tempo e a energia necessários para alcançar uma água clarificada, o que também ajuda a reduzir o custo do processo.
- ✓ Redução do uso de produtos químicos adicionais: Em alguns casos, o uso de polímeros permite diminuir a quantidade de outros coagulantes, como o sulfato de alumínio, melhorando a qualidade da água final e reduzindo o volume de resíduos químicos gerados.

Por fim, os polímeros desempenham um papel crucial na remoção de partículas que causam turbidez, melhorando a eficiência dos processos de clarificação e ajudando a obter uma água de melhor qualidade.

Os resultados dos ensaios de adensamento refletem os resultados para o valor do IVL. Para a concentração de lodo em discussão, assim como nos ensaios de adensamento, o polímero aniônico apresentou os menores valores de IVL. E ainda, assim como o menor valor do IVL também foi com o uso da concentração de 5,00 mg pol./g SST.

Quando postos lado a lado na Figura 47, fica evidente a diferença entre os polímeros para a escolha do IVL e como o polímero aniônico se destaca.

Figura 47 Resultados do IVL para os três polímeros em estudo, nas diferentes dosagens

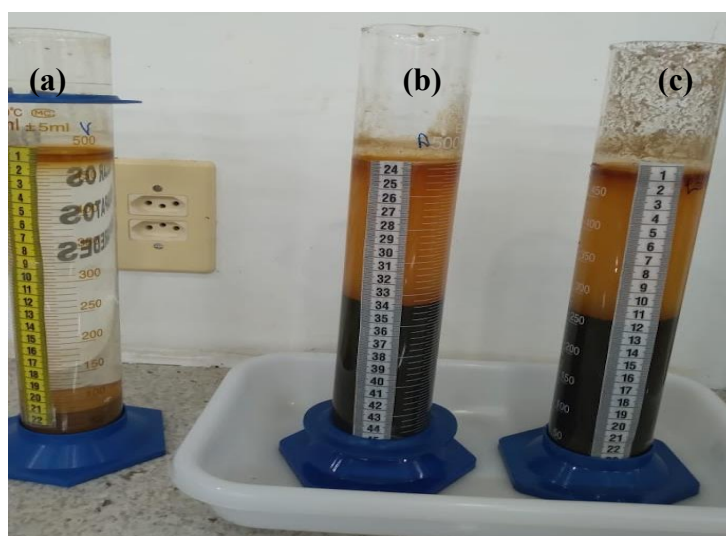


Fonte: Autor, 2024

5.2.2 Ensaios de adensamento com lodo de concentração 22,03 g/L SST

Seguindo a mesma metodologia do lodo de concentração 15,20 g/L SST, foram realizados os ensaios de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST. Estes ensaios se destacaram por apresentar uma turbidez e resultados para a série de sólidos mais elevados como apresentados na Figura 48.

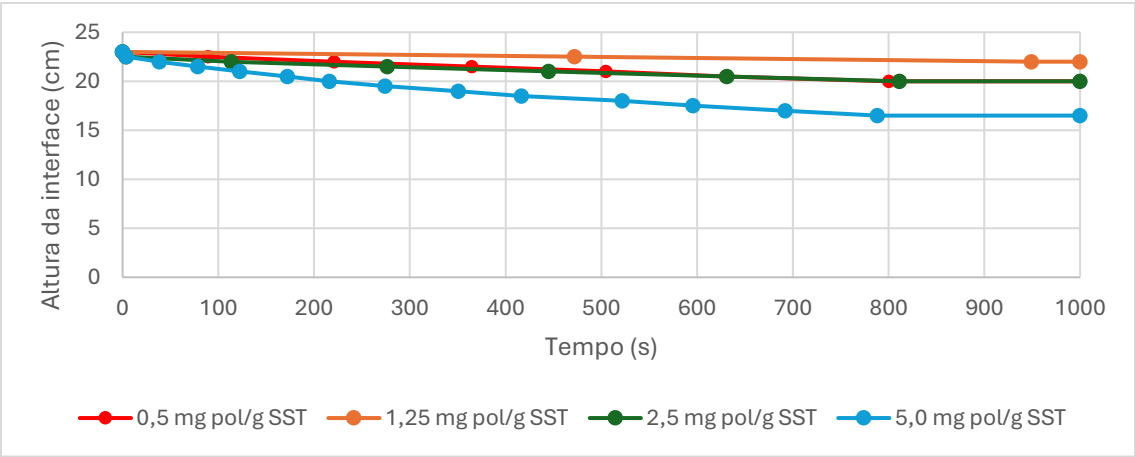
Figura 48 Ensaios de adensamento do lodo de concentração 22,03 g/L SST: (a) Polímero não iônico, (b) aniônico e (c) catiônico



Fonte: Autor, 2024

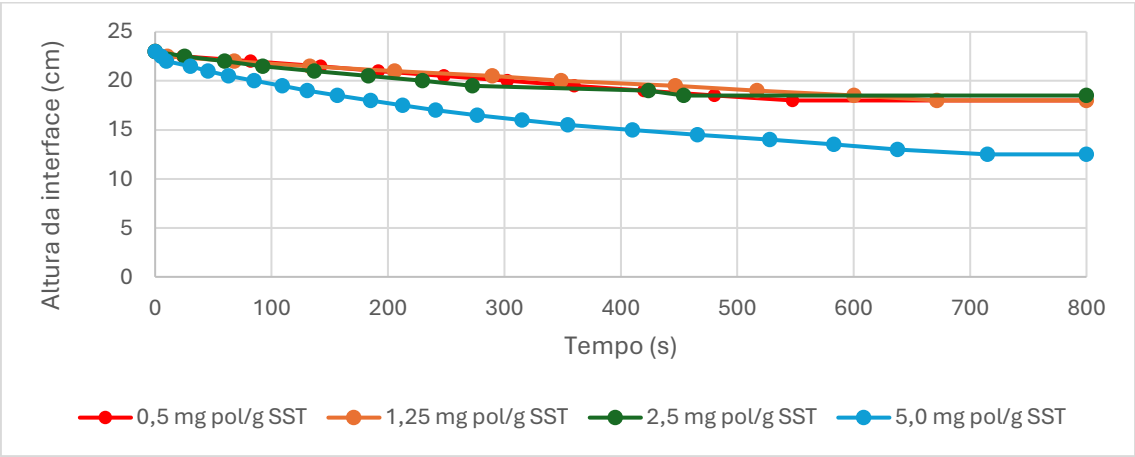
A seguir, as Figuras 49, 50 e 51 apresentam os resultados a partir dos ensaios de adensamento de lodo com a concentração de 22,03 g/L SST com os diferentes tipos e dosagens de polímero usados nos ensaios em bancada. Como citado anteriormente, os resultados da altura da interface da proveta são dados em função da média dos tempos (s) dos ensaios em quintuplicada realizados, e os dados estão apresentados na forma de curva de sedimentação. Os resultados destes ensaios estão nos apêndices deste trabalho.

Figura 49 Curvas de adensamento do lodo com concentração de 22,03 g/L SST com o uso do polímero aniônico



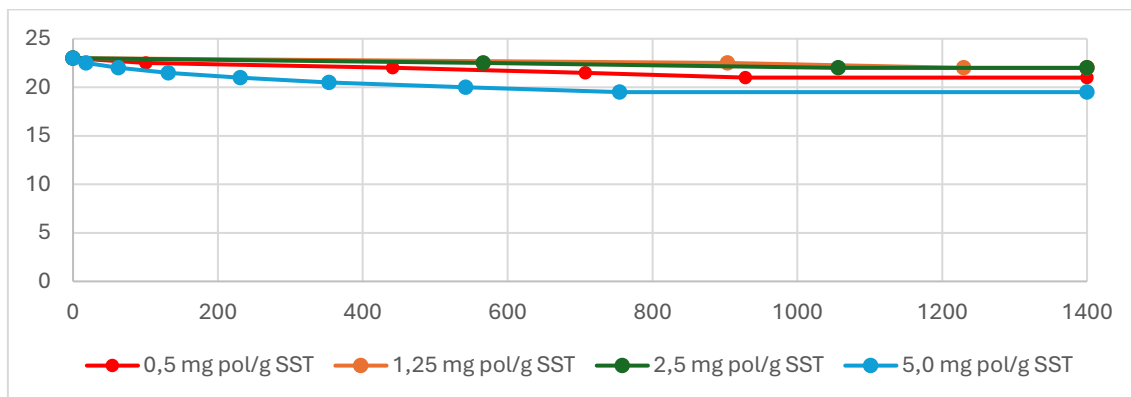
Fonte: Autor, 2024

Figura 50 Curvas de adensamento do lodo com concentração de 22,03 g/L SST com o uso do polímero não iônico



Fonte: Autor, 2024

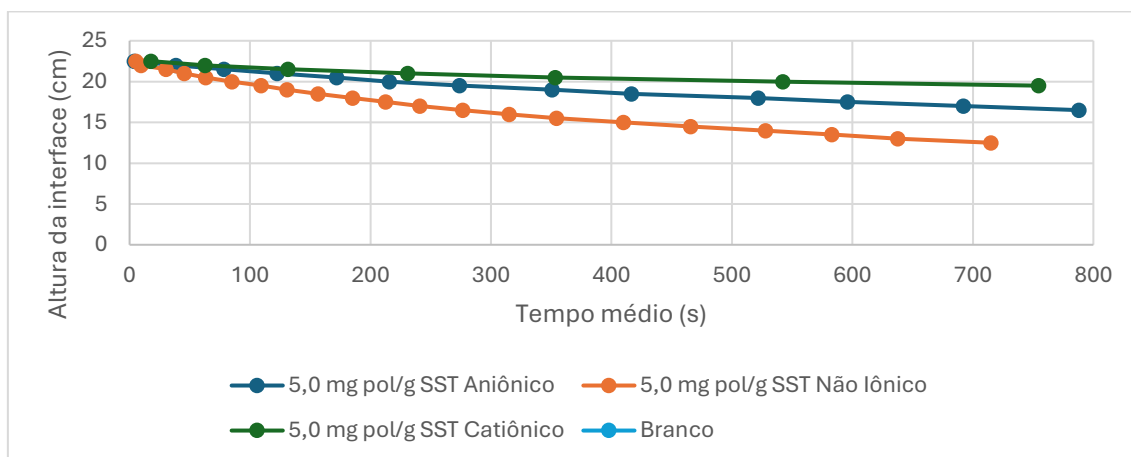
Figura 51 Curvas de adensamento do lodo com concentração de 22,03 g/L SST com o uso do polímero catiônico



Fonte: Autor, 2024

A Figura 52 a seguir apresenta graficamente o comportamento médios das 3 concentrações 5,00 mg pol./g SST dos três polímeros analisados, além da média dos valores obtidos com a amostra em branco desta concentração de lodo. Estas foram, dentre as concentrações usadas, as que apresentaram as maiores sedimentações do lodo com concentração 22,03 g/L SST. Percebe-se a diferença dos resultados, mas ainda assim, o resultado apresentado pelo polímero não iônico se sobressai.

Figura 52 Melhores curvas de adensamento para o lodo de 22,03 g/L SST



Fonte: Autor, 2024

Diferente dos resultados obtidos com o polímero aniônico na concentração de lodo anterior, neste os melhores resultados para sedimentação de lodo foram obtidos com o uso do polímero não iônico. Quanto a concentração, neste ponto o resultado permanece, sendo o uso de 5,00 mg pol./g SST o que apresentou a maior sedimentação.

Apesar do uso dos mesmos condicionantes químicos no tratamento de água e coletados no mesmo decantador, as amostras de lodo apresentaram afinidades com polímeros diferentes. Enquanto a amostra de concentração 15,20 g/L SST adensou de melhor forma com o polímero aniônico, a amostra 22,03 g/L SST já mostrou uma afinidade de adensamento com o polímero não iônico.

A literatura apresenta casos em ensaios de adensamento com diferentes resultados para diferentes concentrações de amostras de lodo. Ismail *et al.* (2022) usando polímeros sintéticos (anônico, catiônico e não iônico) e naturais (Tanfloc SL e Tanfloc SG) em ensaios de adensamento, obteve com o polímero não iônico maiores velocidades de adensamento durante os ensaios. E ainda, nestes mesmos ensaios, o autor encontrou valores de outros parâmetros em que o uso do polímero não iônico se sobressai, como turbidez do sobrenadante, sólidos totais e cor aparente.

Já Mattos & Girard (2008) ao usar os polímeros aniônico, catiônico e não iônico em ensaios de adensamento com amostras de lodo para posterior desaguamento em sistemas mecanizados, usando como parâmetro de decisão o teor de sólidos, não obteve a concentração mínima de 2% com os polímeros não iônico e catiônico, obtendo o resultado desejado apenas para o polímero aniônico.

Uma hipótese a ser levantada é que o lodo gerado a partir da ETA de Araguatins tenha um melhor desempenho no desaguamento a partir da relação entre a concentração de SST e o tipo de polímero. Ou mesmo o período climático pode ser um fator que influenciou este resultado, uma vez que cada uma das amostras de lodo analisadas foi coletada em períodos climáticos distintos.

Quanto a turbidez do sobrenadante, a diferença entre os dois tipos de lodo em estudo foi pequena. De tal forma a série de solos que, apesar do lodo 22,03 g/L SST apresentar uma concentração maior de sólidos, durante os testes de adensamento, as diferenças encontradas também foram pequenas. A Figura 53 mostra algumas amostras do ensaio de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e a Tabela 25, as características do sobrenadante obtido nos ensaios de adensamento com esta amostra de lodo.

Tabela 25 Características do sobrenadante nos ensaios de adensamento do lodo de 22,03 g/L SST

Parâmetro	Unidade	Aniônico	Não iônico	Catiônico
Sólidos Totais	g/L	1,680	2,90	2,60

Continuação				
Parâmetro	Unidade	Aniônico	Não iônico	Catiônico
Sólidos Dissolvidos Totais	g/L	0,954	1,71	1,39
Sólidos suspensos totais	g/L	0,726	1,19	1,21
Turbidez	uT	78	79	78

Fonte: Autor, 2024

Figura 53 Sobrenadante dos testes de adensamento referentes ao lodo 22,03 g/L SST



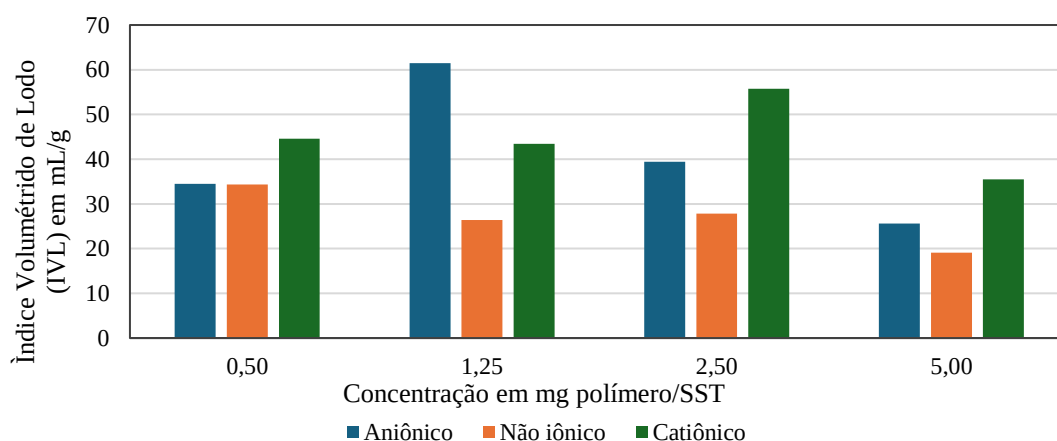
Fonte: Autor, 2024

Silva (2019), em trabalho sobre desaguamento de lodo de ETA em tubo geotêxtil obteve resultados que evidenciaram a remoção de turbidez em ensaios de adensamento com o uso de polímero não iônico era maior a partir do aumento da dosagem do polímero, chegando a alcançar valores acima de 81 uT.

Na análise do IVL para o lodo em discussão, o uso do polímero não iônico apresentou o menor valor ao usar a concentração de 5,00 mg pol./g SST, refletindo novamente os resultados obtidos nos ensaios de adensamento. Já o lodo de concentração 15,20 g/L SST, o menor valor do IVL foi obtido com a utilização do polímero aniônico, também com a dose de 5,00 mg pol./g SST.

A seguir, a Figura 54 apresenta o resultado do IVL para os três polímeros usados nos ensaios do lodo de concentração 22,03 g/L SST.

Figura 54 Resultados do IVL para os três polímeros em estudo



Fonte: Autor, 2024

5.2.3 Avaliação dos Ensaios de adensamento do lodo

Os resultados obtidos para a determinação do IVL objetivaram determinar o polímero e consequentemente, a dosagem mais adequada para o uso na estação piloto. Desta forma, os ensaios realizados em bancada serviram de base para os ensaios na estação piloto.

Após os ensaios de adensamento com a metodologia proposta e adotando o IVL como parâmetro para a escolha da concentração de lodo e dosagem do polímero, a alternativa do lodo de concentração 15,20 g/L SST foi a dosagem 5,00 mg pol./g SST do polímero aniônico. Neste ensaio, o menor IVL encontrado foi 14,60 mL/g. E para a concentração de lodo 22,03 g/L SST, o polímero usado foi o não iônico com a dosagem de 5,00 mg pol./g SST, obtendo o valor de 19,13 mL/g de IVL.

A Tabelas 26 apresenta os valores de IVL obtidos nos ensaios de adensamento para as duas concentrações de lodo e para a amostra em branco.

Tabela 26 Resultados dos ensaios de adensamento em bancada com as duas concentrações de lodo e o branco

Concentração do lodo (g/L SST)	Polímero	Dosagem (mg pol./g SST)	Índice Volumétrico de Lodo (IVL) (mL/g)	Sedimentabilidade
15,20	Aniônico 1530	0,50	18,02	Ótima
		1,25	18,30	Ótima
		2,50	18,02	Ótima
		5,00	14,60	Ótima
	Não iônico 2530	0,50	59,50	Boa
		1,25	62,36	Boa
		2,50	24,89	Ótima
		5,00	22,89	Ótima
	Catiônico 3530	0,50	61,50	Boa
		1,25	56,64	Boa
		2,50	62,07	Boa
		5,00	35,76	Ótima
	Branco	-	49,49	Ótima
22,03	Aniônico 1530	0,50	34,52	Ótima
		1,25	61,49	Boa
		2,50	39,45	Ótima
		5,00	25,64	Ótima
	Não iônico 2530	0,50	34,32	Ótima
		1,25	26,43	Ótima
		2,50	27,81	Ótima
		5,00	19,13	Ótima
	Catiônico 3530	0,50	44,58	Ótima
		1,25	43,40	Ótima
		2,50	55,77	Boa
		5,00	35,51	Ótima
	Branco	-	43,20	Ótima

Fonte: Autor (2024)

5.3 ENSAIOS DE DESAGUAMENTO DO LODO EM BANCADA

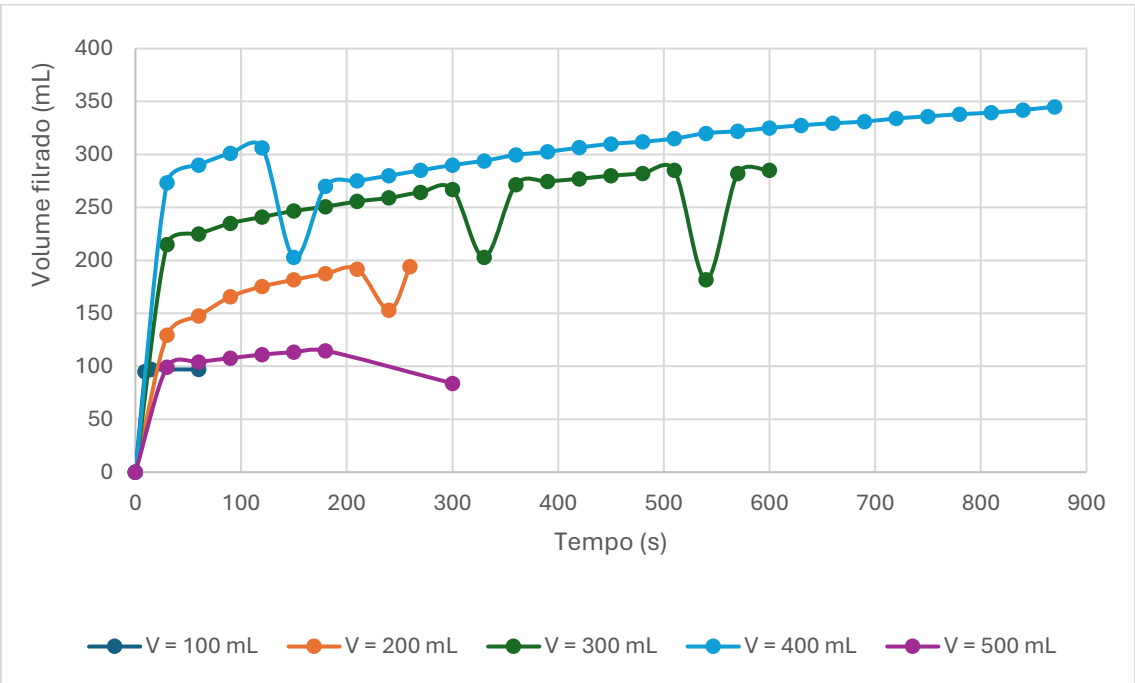
Com a determinação da melhor dosagem do polímero que resultou no menor IVL, os ensaios de desaguamento em bancada se restringiram a dosagem de 5,0 mg pol./g SST e o uso dos polímeros que apresentaram menor IVL foi o aniônico para o lodo de concentração 15,20 g/L SST e o não iônico para o lodo de concentração 22,03 g/L SST.

O passo seguinte foi a realização dos ensaios de desaguamento em bancada em triplicata. O objetivo destes ensaios é verificar, na instalação piloto, o volume de lodo e o

tempo de desaguamento a ser aplicado no geotêxtil. A melhor escolha nesse sentido, se dará usando três parâmetros: o volume filtrado em cada ensaio, o tempo até o final do desaguamento e a taxa de filtração em $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

Neste experimento, os resultados apresentados são os gráficos das médias dos ensaios em triplicata realizados para cada um dos volumes propostos. As Figuras 55 representa os resultados dos valores médios obtidos dos ensaios de desaguamento em bancada através do volume filtrado em função do tempo para o lodo de concentração 15,20 g/L SST. Os resultados de todos os ensaios encontram-se nos apêndices deste trabalho.

Figura 55 Média dos volumes desaguados no ensaio de bancada com a amostra de lodo 15,20 g/L SST



Fonte: Autor, 2024

Quanto aos volumes utilizados nestes ensaios, os volumes 100 mL e 400 mL se destacam. Os primeiros ensaios com estes apresentaram os menores tempos de desaguamento, enquanto o segundo e terceiro ensaio ainda com 400 mL de volume, os maiores em valores absolutos.

Os ensaios com o volume de 500 mL também merecem destaque pois dentre todos os volumes analisados, este apresentou o menor volume filtrado. Os resultados observados tanto durante os experimentos de desaguamento quanto à média dos volumes filtrados, foram os menores dentre os analisados. A Tabela 27 abaixo apresenta, após o

fim do período de desaguamento, a porcentagem dos valores filtrados em cada um dos experimentos para cada um dos volumes.

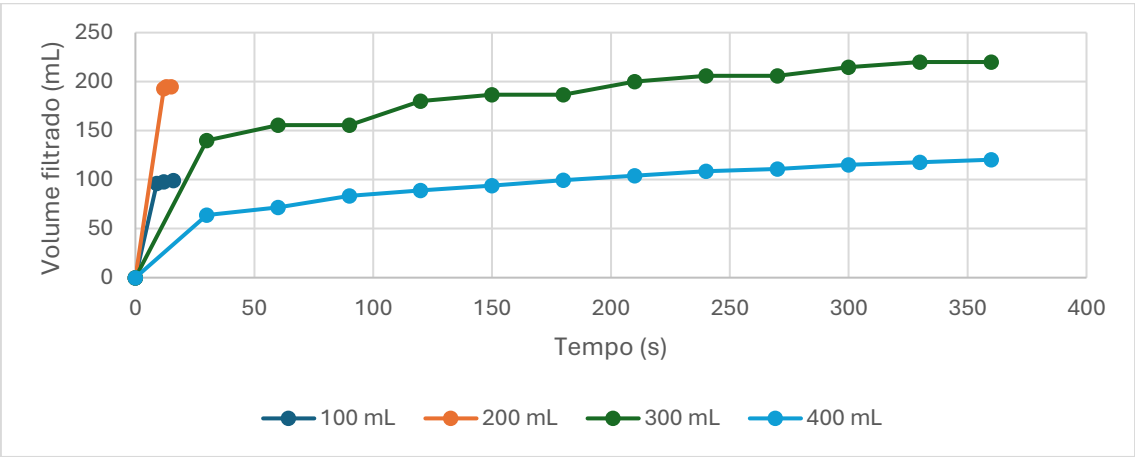
Tabela 27 Porcentagem e tempo de desaguamento dos volumes analisados para a amostra de 15,20 g/L SST

Volume (mL)	Ensaio 1 (%)	Tempo (s)	Ensaio 2 (%)	Tempo (s)	Ensaio 3 (%)	Tempo (s)
100	57	9	61	15	58	60
200	95	240	97	260	99,5	240
300	98,3	510	96	630	92	300
400	99,75	120	84	1110	92,5	870
500	22,6	300	23,4	300	23,2	360

Fonte: Autor, 2024

O ensaio de desaguamento para a amostra de lodo com concentração de 22,03 g/L SST abrangeu o uso dos volumes de 100 mL, 200 mL, 300 mL e 400 mL. A razão para a não utilizar o volume de 500 mL, como usado na amostra de lodo anterior, foi o processo de bloqueamento observado durante todos os ensaios com o volume de 400 mL da manta. Barroso (2007), Moreira (2007) e Silva (2019) observaram o processo de bloqueamento no uso de materiais geotêxteis para desaguamento em áreas como saneamento e mineração. Segundo estes autores, quanto a manta geotêxtil apresenta o bloqueamento, esta atingiu o limite a ser desaguado, comprometendo o processo de desaguamento para maiores volumes. A Figura 56 apresenta a média dos volumes desaguados em função do tempo para o lodo de concentração 22,03 g/L SST. Estes ensaios completos encontram-se nos apêndices a este trabalho.

Figura 56 Média dos volumes desaguados no ensaio de bancada com a amostra de lodo 22,03 g/L SST



Fonte: Autor, 2024

Estes ensaios não apresentaram os mesmos resultados de desaguamento observados com a amostra de lodo anterior. Durante o experimento, ficou constatado que o percentual de volume desaguado diminui ao aumentar o volume da amostra. Desta forma, a amostra de 100 mL apresentou os maiores percentuais de desaguamento, enquanto a de 400 mL, os menores. Acredita-se que o processo de colmatção influencie os valores de desaguamento do lodo para este volume. Do mesmo modo, não se pode descartar que este processo influenciou os baixos valores de desaguamento para o volume de 500 mL no ensaio da amostra anterior.

Na Tabela 28 estão o tempo de desaguamento e a porcentagem desaguada durante os ensaios da amostra 22,03 g/L SST.

Tabela 28 Porcentagem e tempo de desaguamento dos volumes analisados para a amostra de 22,03 g/L SST

Volume (mL)	Ensaio 1 (%)	Tempo (s)	Ensaio 2 (%)	Tempo (s)	Ensaio 3 (%)	Tempo (s)
100	99	12	99	11	99	16
200	98	15	98,5	15	98,5	22
300	89	510	89	360	59	630
400	33	360	31,5	360	25,5	360

Fonte: Autor, 2024

Um parâmetro importante para a análise dos resultados dos ensaios de desaguamento é a taxa de filtração ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), uma vez que ela representa o volume filtrado pela variação de tempo. Desta forma, os valores obtidos na taxa de filtração serviram de base para a escolha, em campo, dos volumes analisados nos ensaios de desaguamento em bancada. Na Tabela 29 estão os resultados para as taxas de filtração das duas amostras ao final dos ensaios de desaguamento em bancada.

Tabela 29 Taxa de filtração, ao fim de cada ensaio de filtração das amostras de lodo analisados

Concentração (g/L SST)	Volume (mL)	Ensaio 1 (m ³ .m ⁻² .h ⁻¹)	Ensaio 2 (m ³ .m ⁻² .h ⁻¹)	Ensaio 3 (m ³ .m ⁻² .h ⁻¹)
15,20	100	0,0733	0,0488	0,0126
	200	0,0306	0,0183	0,0122
	300	0,0183	0,0183	0,0061
	400	0,0061	0,0122	0,0061
	500	0,0000	0,0015	0,0015
22,03	100	0,0611	0,1833	0,0458
	200	0,1222	0,4584	0,0262
	300	0,0183	0,0122	0,0122
	400	0,0122	0,0244	0,0061

Fonte: Autor, 2024

As taxas de filtração observadas na amostra de lodo de 15,20 g/L SST diminuíram a partir do aumento dos volumes usados nos ensaios. Já na amostra 22,03 g/L SST, esse comportamento é observado apenas nos últimos ensaios dos quatro volumes analisados.

Os menores valores da taxa de filtração foram notados onde houve pouca ou nenhuma eficiência no processo de desaguamento, graças ao processo de bloqueamento observado. Já as maiores taxas foram observadas nos primeiros ensaios de ambas amostras.

Os resultados de turbidez foram maiores nos maiores volumes de lodo analisados, com exceção do experimento com volume de 500 mL. Isto pode estar relacionado ao fato deste volume também apresentar a menor porcentagem filtrada e as menores taxas de desaguamento. Silva (2017) em trabalho com mantas geotêxteis, ao analisar a turbidez de filtrados após ensaios de adensamento encontrou situação semelhante onde, através do desaguamento de grandes volumes em que os resultados de turbidez dos filtrados foram considerados baixos, afirmou que isso se dá em função do maior acúmulo de sólidos na trama do geotêxtil, portanto, apresentando menores taxas de desaguamento.

A Tabela 30 a seguir apresenta os valores de turbidez em uT obtidos nos filtrados após cada ensaio.

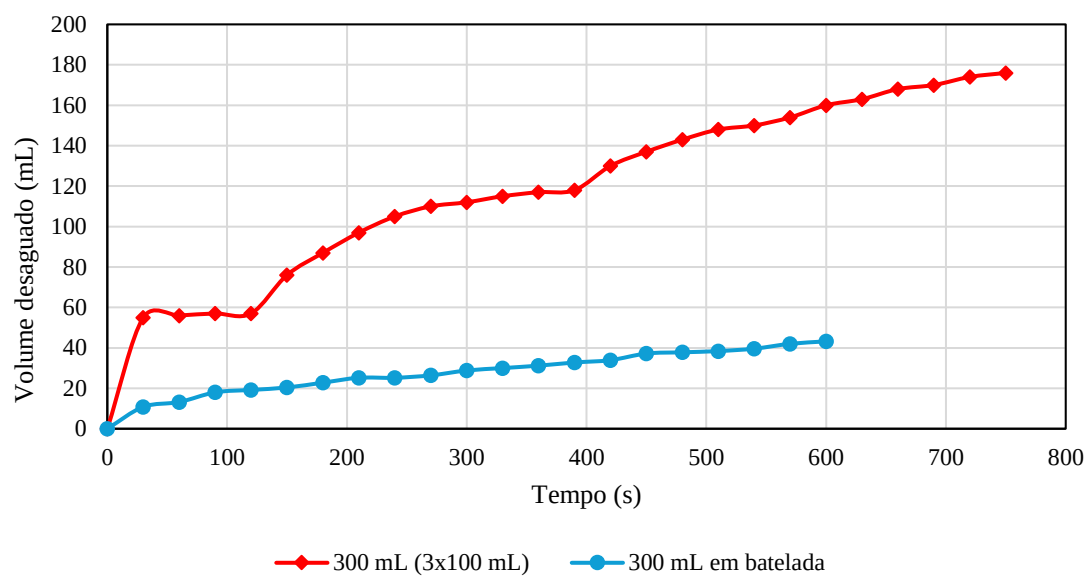
Tabela 30 Valores de turbidez (uT) dos filtrados após cada ensaio de desaguamento

Concentração (g/L SST)	Volume (mL)	Ensaio 1 (uT)	Ensaio 2 (uT)	Ensaio 3 (uT)
15,20	100	55	54	52
	200	51	54	63
	300	61	63	125
	400	111	118	119
	500	15	18	14
22,03	100	81	85	79
	200	66	75	89
	300	77	70	109
	400	20	21	19

Fonte: Autor, 2024

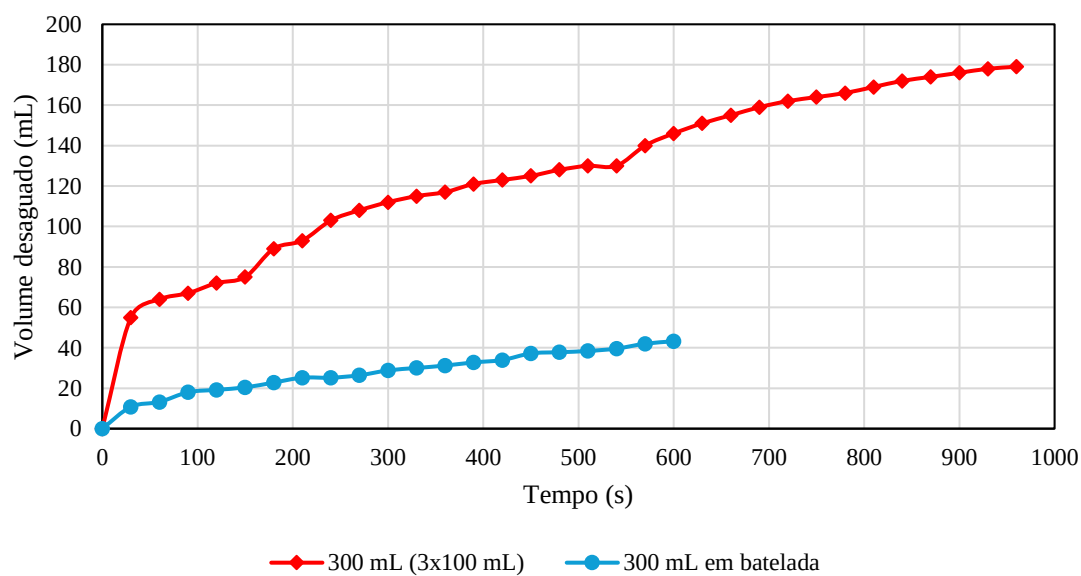
Objetivando verificar o comportamento do volume de 300 mL, que apresentou um valor médio dentre os parâmetros usados para serem extrapolados na instalação piloto, repetiu-se o ensaio de desaguamento em bancada com este volume das duas amostras de lodo, desta vez realizando quatro rodadas: as três primeiras, com o volume de 100 mL, totalizando os 300 mL, não havendo a troca da manta; no último ensaio, o uso de 300 mL em batelada com o uso único da manta geotêxtil. As Figuras 57 e 58 apresentam os volumes obtidos nestes ensaios de desaguamento. Já as Figuras 59 e 60 apresentam as taxas de filtração obtidas nestes ensaios.

Figura 57 Volume desaguado durante o ensaio de adensamento com o volume de 300 mL alternado e em batelada com o lodo de 15,20 g/L SST



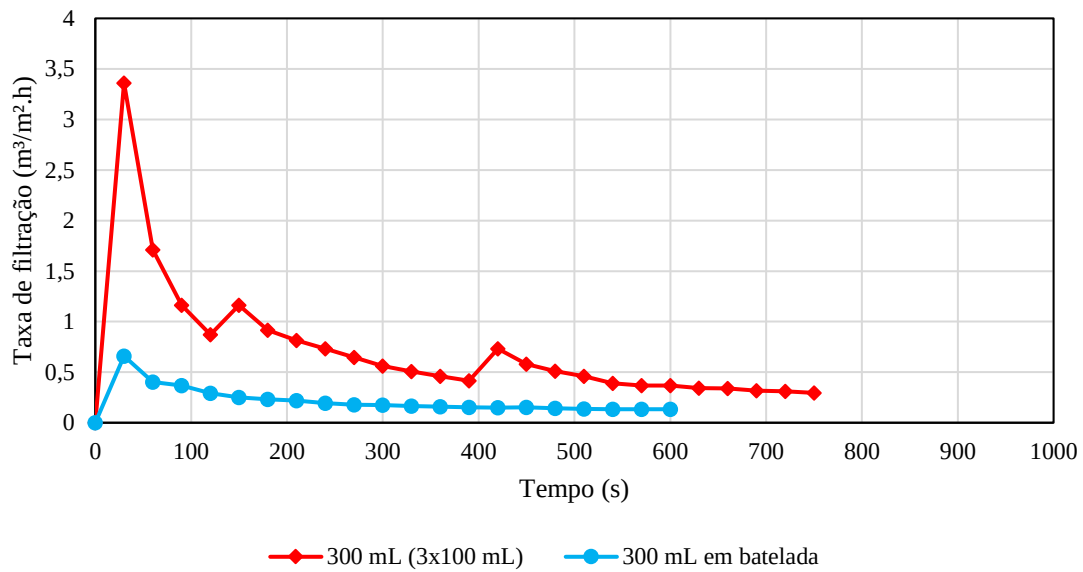
Fonte: Autor, 2024

Figura 58 Volume desaguado durante o ensaio de adensamento com o volume de 300 mL alternado e em batelada com o lodo de 22,03 g/L SST



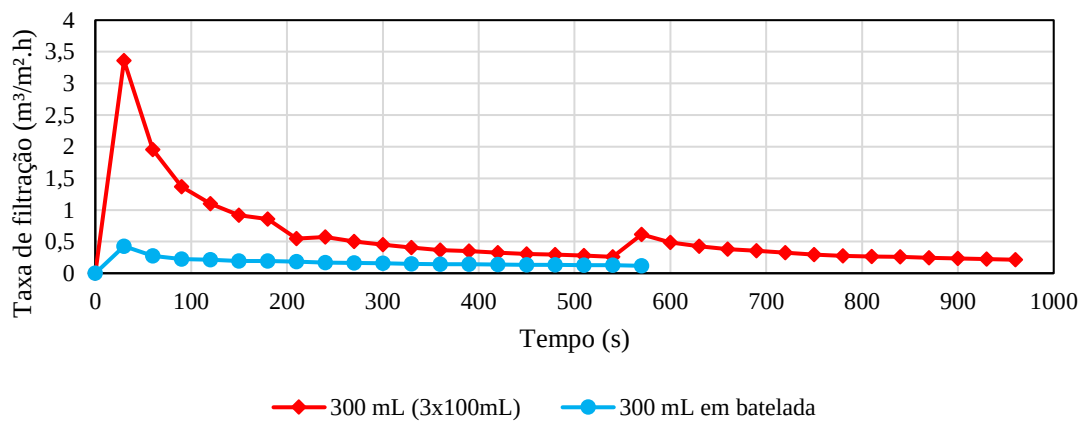
Fonte: Autor, 2024

Figura 59 Taxa de filtração obtida durante o ensaio de adensamento com o volume de 300 mL alternado e em batelada com o lodo de 15,20 g/L SST



Fonte: Autor, 2024

Figura 60 Taxa de filtração obtida durante o ensaio de adensamento com o volume de 300 mL alternado e em batelada com o lodo de 22,03 g/L SST



Fonte: Autor, 2024

Fica claro pelos gráficos apresentados nas Figuras 57 a 60 que o uso alternado em volumes de 100 mL, sem a troca do tecido geotêxtil, apresentou melhores resultados de volume filtrado, tempo de desaguamento e taxa de filtração. E ainda, o volume desaguado obtido com a concentração 15,20 g/L SST foi maior em um tempo menor.

A taxa de filtração ao final de cada ensaio também variou em função do volume e do uso da manta geotêxtil. Conforme a Tabela 19, os três primeiros ensaios de cada amostra apresentaram uma queda da taxa conforme o tecido era utilizado. E ainda, quando

o uso do volume 300 mL em um único despejo, também em ambas, a taxa se apresentou menor do que nos ensaios anteriores.

Tabela 31 Taxas de filtração nos ensaios de desaguamento com o volume de 300 mL alternado e em batelada

Concentração (g/L SST)	Volume (mL)	Taxa de filtração (m ³ .m ⁻² .h ⁻¹)
15,20	100	0,8709
	100	0,4142
	100	0,2954
	300	0,1320
22,03	100	0,9167
	100	0,2586
	100	0,2139
	300	0,1190

Fonte: Autor, 2024

Os resultados destes ensaios foram determinantes para a escolha do uso do volume de 300 mL para ser extrapolado nos ensaios na estação piloto. Essa escolha é embasada ao se levar em consideração as seguintes situações para as duas amostras: durante os ensaios não foram observados processos de impedimento do desaguamento, como o bloqueamento; a quantidade do volume desaguado (acima de 60%); a taxa de filtração ao final do processo e o tempo de desaguamento.

5.4 ENSAIOS NA ESTAÇÃO PILOTO

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos na estação piloto, estes foram divididos em capítulos que abordam dois pontos de análise: a fração sólida do lodo, retida pelo geotêxtil e a fração líquida desaguada.

5.4.1 Determinação do Volume Usado nos Experimentos da Estação Piloto

Como determinado nos ensaios de desaguamento, para as duas concentrações de lodo analisadas, o volume usado nestes ensaios que mais se aproximou da realidade foi o de 300 mL, somados o volume de lodo e dos respectivos polímeros usados para se obter o menor valor do IVL.

A Tabela 32 apresenta os dados usados nos ensaios de desaguamento na estação piloto.

Tabela 32 Dados usados nos experimentos da estação piloto

Concentração do lodo (g/L SST)	Quantidade de ensaios	Polímero	IVL	Vol. do lodo (L)	Vol. da solução de polímero (L)	Vol. total (L)
15,20	3	Aniônico	14,60	24	1,8	25,8
22,03	3	Não iônico	19,13	24	2,6	26,6

Fonte: Autor, 2024

5.4.2 Ensaios de Desaguamento na Estação Piloto com Lodo 15,20 g/L SST

Como citado na metodologia, os experimentos de desaguamento na estação piloto tiveram por objetivo verificar a capacidade de desaguamento da manta geotêxtil. Neste ponto, foram coletados a cada minuto uma amostra do filtrado para análise e dentre esses parâmetros, a turbidez é essencial para a verificar a qualidade do filtrado.

Para o lodo de concentração 15,20 g/L SST, foram realizados três ensaios seguidos, sem a troca da manta, consistindo no despejo de um volume de 25,8 L no reservatório principal, da solução de lodo com o polímero correspondente ao menor IVL encontrado. Foi instalado também com o auxílio de uma braçadeira de plástico uma régua para medição da altura do lodo durante os experimentos de adensamento. Desta forma, foi possível aferir durante o desaguamento, a altura da *filter cake*.

A Figura 61 a seguir apresenta um experimento de desaguamento na estação piloto e a régua instalada no reservatório principal.

Figura 61 *Filter cake* e régua no reservatório de desaguamento



Fonte: Autor, 2024

Para a concentração de lodo de 15,20 g/L SST, houve um tempo total de seis minutos até o fim do processo de desaguamento. Como se esperado, a primeira rodada do experimento foi com um tempo menor, visto que era o primeiro uso da manta e os poros do geotêxtil ainda não apresentavam nenhum resíduo. Ainda, a quantidade de volume foi a menor filtrada dentre as três analisadas.

No primeiro experimento, a turbidez do filtrado apresentou valor mínimo de 51,5 uT e máximo 63,3 uT. Na segunda rodada, variou de 42,0 uT a 61,3 uT. Por fim, na terceira, 77,1 uT e 93,3 uT respectivamente valor mínimo e máximo. Destaca-se que, em análise de turbidez do resíduo antes de cada rodada, foram encontrados os seguintes valores: 1ª rodada, 1000 uT; 2ª rodada, 990 uT; 3ª rodada, 1000 uT; estas análises foram realizadas na mistura do resíduo com o polímero. Percebe-se, nesse caso, a importância da dosagem correta do condicionante químico. Satyamurthy e Bhatia (2009) destacam a necessidade de ajustar corretamente a dosagem do polímero, já que a ausência ou com a dose errada, o geotêxtil será impedido de reter partículas muito finas, principalmente em materiais a base de argila ou resíduos com concentrações de sólidos mais baixas.

A Tabela 33 apresenta os dados obtidos na primeira rodada do experimento na estação piloto usando o lodo de concentração 15,20 g/L SST.

Tabela 33 Turbidez, volume filtrado, tempo de desaguamento e H da *filter cake* do lodo de concentração 15,20 g/L SST – rodada 1

Tempo (minutos)	Turbidez (uT)	H _t
0	63,3	32,1
1	62,9	32,4
2	57,7	32,7
3	59,1	33
4	62,6	33,3
5	58,4	33,4
6	51,5	33,5
Volume de lodo com polímero aniônico (L)	25,8	
Volume desaguado (L)	14	
% do volume filtrado	54,26	
Tempo de desaguamento (minutos)	6	
H sedimentada (cm)	1,4	
Velocidade de sedimentação (cm/min)	0,0233	

Fonte: Autor, 2024

O tempo zero representa a primeira coleta assim que o registro do reservatório principal é aberto, logo após o despejo completo do resíduo neste reservatório. A partir de então, as coletas e os dados são realizados a cada um minuto até cessar o desaguamento.

A Figura 62 apresentam a altura inicial e a altura final da *filter cake* durante 1 dos ensaios de desaguamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST.

Figura 62 Altura inicial e altura final do ensaio de desaguamento - concentração 15,20 g/L SST



Fonte: Autor, 2024

A partir da segunda rodada já existe a influência do uso anterior da manta geotêxtil. O primeiro ponto perceptível é o tempo de desaguamento, que chegou a ser superior ao dobro do tempo anterior. Isso se reflete no volume filtrado (69,76%), que apesar de ser maior do que na primeira rodada, gerou uma menor H final do *filter cake*.

A velocidade de sedimentação menor do que na primeira rodada também sofreu influência do uso da manta. Com um tempo maior de desaguamento e uma H_i menor, a velocidade foi menor.

A presença das partículas presas no geotêxtil influenciou em todos os aspectos na segunda rodada incluindo a turbidez, variando entre 43,9 uT (mínima) e 61,3 uT (máxima), inferiores aos da primeira rodada. A Tabela 34 apresenta os resultados da segunda rodada.

Tabela 34 Turbidez, volume filtrado, tempo de desaguamento e H decantada do lodo de concentração 15,20 g/L SST – rodada 2

Tempo (minutos)	Turbidez (uT)	H_i (cm)
0	43,9	31,4
1	45,7	31,6
2	46,3	31,7
3	42,0	31,7
4	51,7	31,8
5	42,3	31,8
6	55,4	31,9
7	61,3	31,9
8	46,5	32
9	53,1	32
10	51,4	32,1
11	48,9	32,2
12	51,0	32,3
13	60,7	32,3
Volume de lodo com polímero aniônico (L)	25,8	
Volume desaguado (L)	18	
% do volume desaguado	69,76	
Tempo de desaguamento (minutos)	13	
H sedimentada (cm)	0,9	
Velocidade de sedimentação (cm/min)	0,069	

Fonte: Autor, 2024

A Tabela 35 apresenta os resultados da 3ª rodada. O que chama a atenção inicialmente é a turbidez mais elevada em comparação aos outros ensaios. Aqui mais uma vez, o uso anterior da manta geotêxtil acabou influenciando pela presença de mais partículas na estrutura dos poros. Importante citar Silva (2019) ao afirmar que ao longo do processo de desaguamento, algumas partículas sólidas vedam as aberturas de filtração da manta geotêxtil, ocupando dessa forma esses espaços. Portanto, a permeabilidade do geotêxtil é prejudicada, dificultando a saída do efluente.

Apesar de ter o mesmo volume desaguado, aqui ele ocorreu mais rapidamente, levando dois minutos a menos para completar o processo de desaguamento.

Este último experimento também veio a confirmar que a primeira rodada do ensaio apresentou a menor velocidade de sedimentação, graças à velocidade do processo de desaguamento, influenciada pelo primeiro uso da manta.

Tabela 35 Turbidez, volume filtrado, tempo de desaguamento e H decantada do lodo de concentração 15,20 g/L SST – rodada 3

Tempo (minutos)	Turbidez (uT)	H_t
0	93,3	30,2
1	85,6	30,4
2	86,3	30,4
3	86,4	30,5
4	84,9	30,6
5	91,5	30,7
6	82,4	30,7
7	81,8	30,8
8	85,6	30,8
9	78	30,9
10	77,1	31
11	85	31,1
Volume de lodo com polímero aniônico (L)	25,8	
Volume desaguado (L)	18	
% do volume desaguado	69,76	
Tempo de desaguamento (minutos)	11	
H sedimentada (cm)	0,9	
Velocidade de sedimentação (cm/min)	0,081	

Fonte: Autor, 2024

A Tabela 36 mostra os resultados resumidos dos parâmetros obtidos nas três rodadas dos ensaios com o filtrado do lodo de concentração 15,20 g/L SST. Na última rodada, os valores máximo e mínimo da turbidez foram os maiores obtidos no experimento com esta concentração de lodo e a maior velocidade de sedimentação. Isto pode ser explicado pelo uso da manta, com um maior número de partículas nos poros.

Tabela 36 Tempo de desaguamento, velocidade de sedimentação e turbidez na estação piloto amostra 15,20 g/L SST

Parâmetro	Rodada 1	Rodada 2	Rodada 3
Tempo de desaguamento (min.)	6	13	11
Velocidade de sedimentação (cm/min)	0,023	0,069	0,081
Turbidez máxima (uT)	63,3	61,3	93,3
Turbidez mínima (uT)	51,5	42,0	77,1

Fonte: Autor, 2024

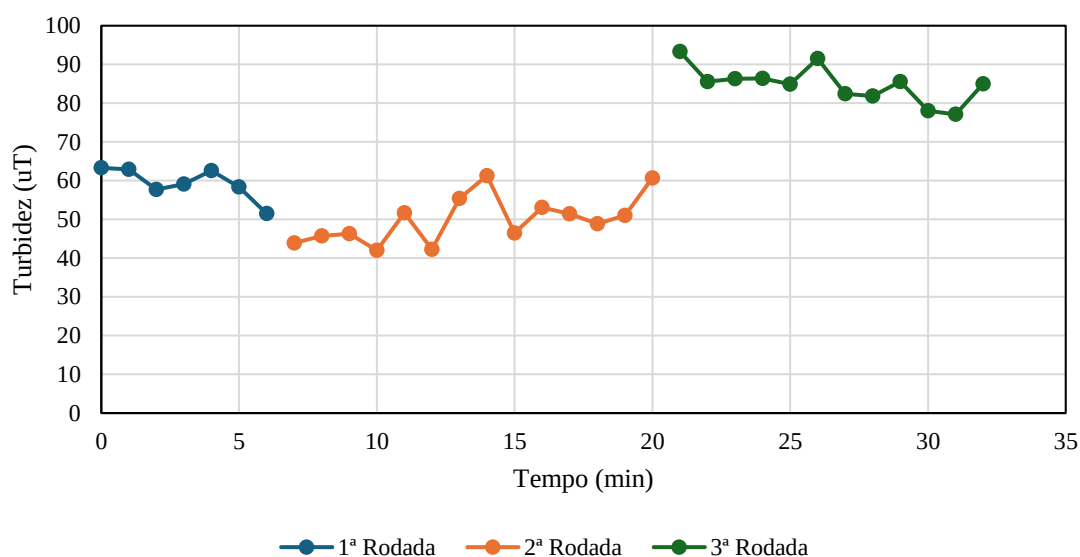
Quando analisados os resultados da turbidez em função do tempo, percebe-se que em todas as rodadas, o menor valor de turbidez foi 42,0 uT e o maior, 93,3 uT. Quando analisados junto a outros parâmetros, percebe-se que o menor valor da turbidez foi obtido no ensaio em que houve o maior tempo de desaguamento. E a maior turbidez foi obtida na terceira rodada, com a maior velocidade de sedimentação e com a manta geotêxtil já usada anteriormente, portanto com maior presença de partículas nos poros do tecido.

Ao longo das rodadas, foram observados picos de turbidez, mesmo em ensaios com tempo reduzido. Ismail (2020), afirma que esses picos de turbidez durante o processo de desaguamento podem indicar alta taxa de retenção de partículas e/ou impurezas no meio filtrante.

Aqui cabe destacar que, mesmo o maior valor da turbidez encontrado sendo 93,3 uT, ainda é muito inferior do que o observado na turbidez do resíduo antes do processo de desaguamento – variando de 990 a 1000 uT. No contexto geral, a turbidez observada no sobrenadante ainda está próxima aos valores obtidos nos ensaios de desaguamento em bancada para o volume selecionado – 61 uT a 125 uT.

A Figura 63 a seguir apresenta os resultados para a turbidez das três rodadas de experimento usando o lodo de concentração 15,20 g/L SST e a dosagem de 5,00 mg pol./g SST.

Figura 63 Turbidez do filtrado nas rodadas na estação piloto - lodo concentração 15,20 g/L SST



Fonte: Autor, 2024

5.4.3 Ensaio de Desaguamento na Estação Piloto com Lodo de Concentração 22,03 g/L SST

Com o término das rodadas com o lodo de concentração 15,20 g/L SST, houve a troca da mata geotêxtil e o início das rodadas com o lodo de concentração 22,03 g/L SST. A metodologia adotada foi a mesma, com a manta sendo mantida por 3 rodadas. Como diferença, o volume usado nas rodadas foi maior. A Tabela 37 mostra os resultados obtidos na 1ª rodada dos ensaios com o lodo de concentração 22,03 g/L SST.

A primeira rodada com esta amostra de resíduo também foi a que apresentou o processo de desaguamento mais rápido – 5 minutos. Com isso, a altura do *filter cake* foi rapidamente atingida, fazendo com que a velocidade de sedimentação fosse baixa. Percebe-se que já no segundo minuto, a altura final já foi alcançada, mas optou-se por esperar cinco minutos, visando a coleta do filtrado para a análise dos parâmetros.

Assim como nas rodadas com a amostra de lodo anterior, a cada início do processo de desaguamento, foi realizada a coleta do resíduo e análise da turbidez. Para as 3 rodadas deste ensaio, a turbidez atingiu valores acima de 1000 uT.

Durante a primeira rodada, a turbidez variou de 126 uT a 143 uT, atingindo esses resultados respectivamente na última e primeira coleta do filtrado.

Tabela 37 Turbidez, volume filtrado, tempo de desaguamento e H da *filter cake* do lodo de concentração 22,03 g/L SST – rodada 1

Tempo (minutos)	Turbidez (uT)	H _t (cm)
0	143	35,0
1	136	35,8
2	133	35,8
3	127	35,8
4	128	35,8
5	126	35,8
Volume de lodo com polímero aniônico (L)	26,6	
Volume desaguado (L)	17	
% do volume desaguado	63,90	
Tempo de desaguamento (minutos)	5	
H sedimentada (cm)	0,80	
Velocidade de sedimentação (cm/min)	0,160	

Fonte: Autor, 2024

A segunda e terceira rodadas apresentam os valores de turbidez mais elevados – entre 84 uT e 155 uT, mantendo uma porcentagem de desaguamento de volume acima de 60%. Por fim, ambas apresentam uma altura da *filter cake* acima de 1,5 cm, mantendo a tendência nos valores da velocidade de sedimentação acima de 0,1 cm/min, maiores do que os apresentado nos experimentos com o lodo de concentração 15,20 g/L SST. As Tabela 38 e 39 apresentam os resultados da rodada nº 2 e nº 3.

Vale recordar que, nesta rodada, a manta de geotêxtil já foi usada em 3 rodadas anteriores. Portanto, existem muitas partículas nos poros do tecido influenciando no processo de desaguamento.

Não se deve ignorar ainda o fato destes resultados de turbidez serem mais elevados do que os da amostra anterior. Silva (2017) analisando diversos materiais geotêxteis constatou que, usando o polímero não iônico para os processos de desaguamento em diferentes concentrações de SST, sempre encontrou maiores valores de turbidez em maiores concentrações de SST.

Quanto ao volume filtrado, a tendência das rodadas anteriores se manteve nesta, ficando acima dos 60%.

Tabela 38 Turbidez, volume filtrado, tempo de desaguamento e H da *filter cake* do lodo de concentração 22,03 g/L
SST – rodada 2

Tempo (minutos)	Turbidez (uT)	H_t (cm)
0	155	34,0
1	129	34,4
2	146	34,5
3	144	34,7
4	125	34,7
5	132	34,8
6	121	34,8
7	139	34,9
8	138	35,0
9	119	35,0
10	116	35,1
Volume de lodo com polímero aniônico (L)	26,6	
Volume desaguado (L)	18	
% do volume desaguado	67,66	
Tempo de desaguamento (minutos)	10	
H sedimentada (cm)	1,1	
Velocidade de sedimentação (cm/min)	0,110	

Fonte: Autor, 2024

Tabela 39 Turbidez, volume filtrado, tempo de desaguamento e H da *filter cake* do lodo de concentração 22,03 g/L
SST – rodada 3

Tempo (minutos)	Turbidez (uT)	H_t (cm)
0	136	34
1	133	35,2
2	130	35,2
3	124	35,2
4	116	35,2
5	99,2	35,3
6	92,6	35,3
7	94,2	35,4
8	86,4	35,4
9	88	35,5
10	84,7	35,5
Volume de lodo com polímero aniônico (L)	26,6	
Volume desaguado (L)	16	
% do volume desaguado	60,15	
Tempo de desaguamento (minutos)	10	

H sedimentada (cm)	1,0
Velocidade de sedimentação (cm/min)	0,100

Fonte: Autor, 2024

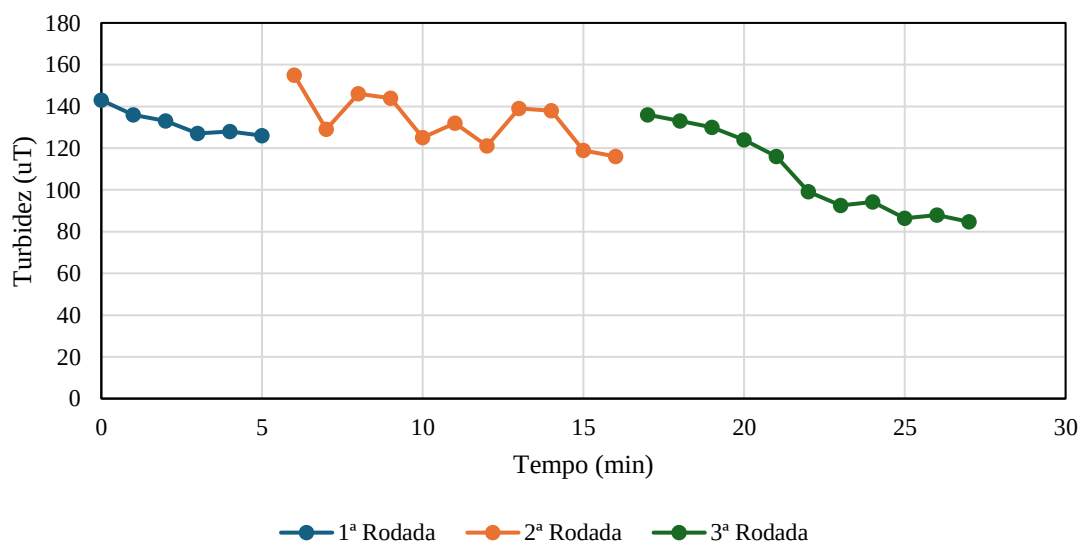
A Tabela 40 a seguir apresenta os valores mínimo e máximo da turbidez nas rodadas com o lodo de concentração 22,03 g/L SST, e a Figura 64 apresenta um gráfico com os valores de turbidez pelo tempo de desaguamento em minutos.

Tabela 40 Resumo dos parâmetros do filtrado – concentração 22,03 g/L SST

Parâmetro	Rodada 1	Rodada 2	Rodada 3
Tempo de desaguamento (min.)	5	10	10
Velocidade de sedimentação (cm/min.)	0,160	0,110	0,100
Turbidez máxima (uT)	143	155	136
Turbidez mínima (uT)	126	116	84,7

Fonte: Autor, 2024

Figura 64 Turbidez do filtrado nas rodadas na estação piloto - lodo concentração 22,03 g/L SST



Fonte: Autor, 2024

A análise dos resultados de turbidez obtidos com as duas concentrações de lodo permite afirmar que os valores de turbidez ao fim do processo de desaguamento são menores do que os valores da primeira coleta dos ensaios.

Ainda na análise dos resultados de turbidez, ambas obtiveram valores consideráveis de remoção. Em função da média dos valores de obtidos nos ensaios de desaguamento, a porcentagem de remoção ficou acima de 76%, chegando a 94%. A Tabela 41 apresenta a porcentagem de remoção da turbidez nos filtrados após o processo de desaguamento para as duas amostras de lodo.

Tabela 41 Resultados da turbidez e da porcentagem de remoção no filtrado do lodo das duas concentrações de lodo

Lodo (g/L SST)	Ensaio	Turbidez máxima (uT)	Turbidez mínima (uT)	Turbidez média (uT)	% Remoção da turbidez
15,20	Rodada 1	63,3	51,5	57,4	94,26
	Rodada 2	61,3	42,0	51,8	94,82
	Rodada 3	93,3	77,1	85,2	91,48
22,03	Rodada 1	143	126	134,50	86,55
	Rodada 2	155	116	135,50	86,45
	Rodada 3	136	84,7	110,35	88,97

Fonte: Autor, 2024

Como citado anteriormente, o lodo de concentração 15,20 g/L SST, apresentou na segunda rodada os menores valores máximo e mínimo de turbidez, onde ocorreu o maior tempo de desaguamento. Já o lodo de concentração 22,03 g/L SST, esses resultados foram obtidos na terceira rodada, onde a velocidade de sedimentação também foi a menor. Ismail (2020), analisando a relação entre turbidez e velocidade de sedimentação aponta a relação direta entre estes parâmetros, afirmando que os menores valores de turbidez são obtidos em velocidades de sedimentação menores.

5.4.4 Taxas de Filtração e Porcentagem de Sólidos das Amostras de Lodo

A taxa de filtração observada na estação piloto foi dada em função do tempo final das rodadas, uma vez que não foi possível mensurar o volume filtrado em intervalos de tempo ao longo de cada ensaio.

A Tabela 42 a seguir apresenta as taxas de filtração dos ensaios com ambas as amostras de lodo.

Tabela 42 Resultados das taxas de filtração em $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ das duas concentrações de lodo

Ensaio	15,20 g/L SST	22,03 g/L SST
Rodada 1	0,2930	0,4270
Rodada 2	0,1739	0,2260
Rodada 3	0,2055	0,2009

Fonte: Autor, 2024

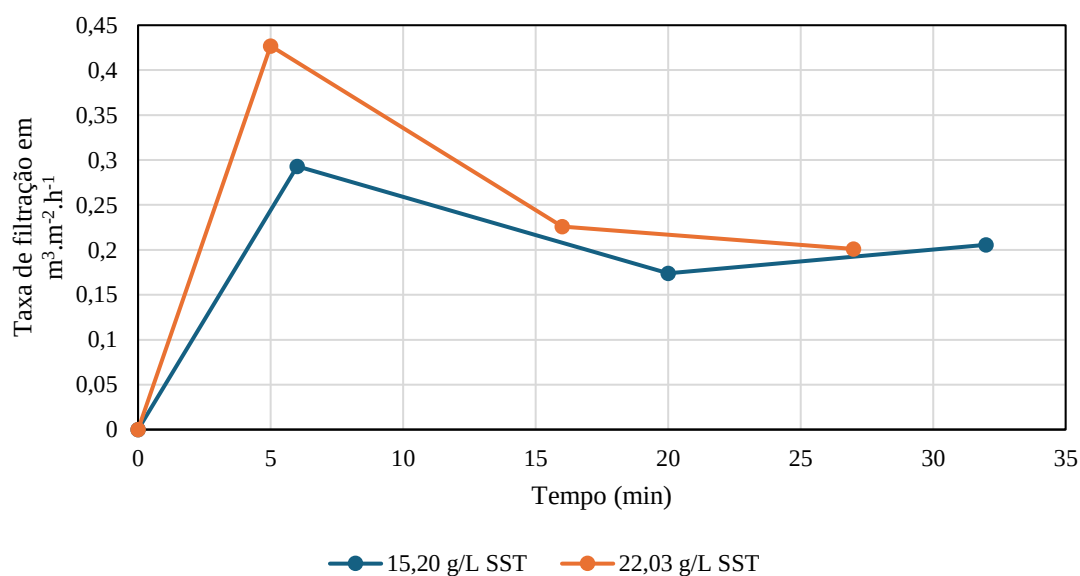
As primeiras rodadas em ambas as concentrações apresentaram as maiores taxas de filtração, uma vez que foram as que mais rapidamente concluíram o processo de desaguamento do resíduo.

A concentração 15,20 g/L SST apresentou na segunda rodada uma diminuição da taxa de filtração, mas na terceira, adotando o mesmo volume, houve um aumento. Na outra concentração de lodo a taxa de filtração foi diminuindo a cada rodada.

Ao se comparar com os ensaios de bancada, nota-se que ao final do experimento, obtiveram-se resultados próximos nos dois ensaios. Desta forma, os ensaios de desaguamento em bancada obtiveram resultados próximo à realidade de campo.

A Figura 65 a seguir apresenta o comportamento da taxa de filtração das duas amostras de lodo.

Figura 65 Taxa de filtração das amostras de lodo



Fonte: Autor, 2024

Ao analisar a Figura 65 observa-se um comportamento semelhante nas duas amostras, seguido por uma tendência de alta na amostra 15,20 g/L SST e de baixa na amostra 22,03 g/L SST.

A Tabela 43 apresenta as taxas de filtração e a porcentagem de remoção da turbidez nos filtrados das duas amostras em estudo após o processo de desaguamento. Em ambas, o maior percentual de remoção de turbidez de cada amostra de lodo foi encontrado nas menores taxas de filtração.

Tabela 43 Taxa de filtração e remoção da turbidez da amostra de lodo 15,20 g/L SST

Lodo (g/L SST)	Ensaio	Taxa de filtração $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$	Turbidez média (uT)	% Remoção da turbidez
15,20	1	0,2930	57,4	94,26
	2	0,1739	51,8	94,82
	3	0,2055	85,2	91,48
22,03	1	0,4270	134,50	86,55
	2	0,2260	135,50	86,45
	3	0,2009	110,35	88,97

Fonte: Autor, 2024

Silva (2019) é enfático ao afirmar que a dosagem do polímero é fator determinante para a taxa de filtração. Em trabalho com bags de desaguamento de lodo de ETA, o autor analisou várias dosagens de polímero em função do tempo, e constatou a influência da taxa de filtração na remoção da turbidez e no processo de desaguamento.

Constatação corroborada em trabalho de Silva (2017) ao encontrar menores valores de turbidez em ensaios de desaguamento quando a taxa de filtração foi menor. Neste caso, segundo o autor, isso se dá em função da retenção de partículas no geotêxtil, influenciando os resultados de turbidez e na filtração, impedindo assim uma maior eficiência no desaguamento da fração líquida.

Quando comparadas com a Resolução CONAMA nº 357/2005, em corpos hídricos de classe 2, a turbidez obtida dos filtrados a partir do lodo de concentração 22,03 g/L SST supera os preconizados na referida resolução (até 100 uT), inviabilizando o descarte deste filtrado em corpos hídricos. Já para o lodo com concentração 15,20 g/L SST, os valores de turbidez do filtrado encontram-se dentro do limite da legislação, sendo permitido o descarte em corpos hídricos.

5.4.5 Teor de Sólidos Retidos na Manta Geotêxtil e Percentual de Desaguamento

Após o término de cada rodada, foi coletada uma amostra do resíduo localizado à meia altura do recipiente (20 cm) de desaguamento. A partir daí foi realizada a análise dos SST e da umidade das amostras, além do percentual de desaguamento.

A remoção eficiente da umidade presente nos resíduos é um dos principais objetivos dos sistemas que empregam filtração com mantas geotêxteis. Neste estudo, a eficiência de remoção da umidade foi avaliada utilizando-se o percentual de desaguamento (PD) e o teor de sólidos no resíduo desaguado. O PD representa um índice que quantifica a remoção de umidade do resíduo, enquanto o teor de sólidos no resíduo desaguado é um parâmetro prático e amplamente aplicado na operação diária dos sistemas de desaguamento (Queiroz, 2019). Esse parâmetro orienta os técnicos sanitaristas na tomada de decisões sobre a destinação mais adequada do resíduo.

Para avaliar o percentual de desaguamento da instalação piloto, a Tabela 44 a seguir apresenta o percentual de desaguamento e a concentração do lodo em g/L do resíduo após o processo de desaguamento.

Através da análise da Tabela 44, percebe-se que o PD de todas as amostras se apresenta superior a 88% e que este aumenta a cada rodada de ensaio. Isso já era esperado, uma vez que a partir da segunda rodada, ao despejar mais lodo no tecido, este já apresenta o resíduo restante do ensaio anterior.

Tabela 44 Parâmetros de análise do resíduo após o processo de desaguamento

SST da amostra (g/L)	Rodada	Teor de sólidos após desaguamento (%)	Percentual de desaguamento (%)	Umidade (%)
15,20	1	12,70	88,88	25
	2	10,65	89,76	28
	3	10,45	90,15	28,25
22,03	1	19,96	89,17	48,70
	2	19,31	90,22	51,20
	3	18,40	94,48	58,58

Fonte: Autor, 2024

Também não se pode descartar que o PD variou conforme o teor de SST observado no resíduo pós desaguamento. Gaffney et. al. (1999) afirma que tal efeito é

diretamente ligado à formação da *filter cake* que adere diretamente ao material geotêxtil, aumentando a retenção de partículas e diminuindo a permeabilidade do tecido ou do material geotêxtil; conseqüentemente, influenciando no processo de desaguamento.

Queiroz (2019) em trabalho com tubos geotêxteis afirma que a concentração inicial de SST do lodo continua sendo a principal influência nos valores de PD, ao observar amostras em que o SST apresentava variações ao longo dos ensaios, o PD também era variado.

Silva (2019) cita ainda a influência da dosagem de polímeros em PD e concentrações de sólidos ao estudar o desaguamento de lodos de ETA's em *bags*, afirmando que obteve melhores valores de PD e concentração de sólidos em ensaios com maiores dosagens de polímeros.

O teor de sólidos é um dos parâmetros que devem ser levados em consideração quando se realizam estudos sobre resíduos de ETA's. O teor de sólidos mínimo que um resíduo deve ter e como estimar esse valor ao final do desaguamento devem ser levados em consideração quando se escolhe a melhor forma de tratamento/desaguamento deste resíduo.

A literatura é bastante enfática ao afirmar que o tipo, teor e dosagem de polímero tem influência direta sobre o teor de sólidos de uma amostra resíduo. Queiroz (2019), Worley *et al.* (2017) e Myers (2010) realizaram trabalhos de desaguamento em mantas e *bags* geotêxteis e afirmam a influência direta nos valores do teor de sólidos ao usarem o polímero aniônico. Uma hipótese levantada é a de que como polímeros apresentam um comportamento hidrofílico, os flocos têm um aumento na sua umidade (Queiroz, 2019).

Não se pode ignorar que as coletas para a análise tanto do PD quanto do teor de sólidos realizadas neste trabalho foram realizadas logo após o fim do processo de desaguamento. Neste caso, não houve, como em rotinas de ETA's, a influência do clima no processo de secagem. Isto acaba, possivelmente, por alterar os resultados de ambos os parâmetros. Silva (2019) constatou um aumento considerável no teor de sólidos ao realizar o monitoramento deste parâmetro durante 17 dias, aumentando este teor com o passar do tempo.

5.4.6 Eficiência de Filtração

A eficiência de filtração é um dos índices de desempenho mais utilizados na análise do grau de retenção de partículas em geotêxteis (Queiroz, 2019). Seu método

consiste na medição de remoção, em percentual, dos SST do filtrado em relação ao SST do resíduo antes do processo de desaguamento.

Para avaliar o desempenho da retenção do desaguamento na estação piloto, estão apresentadas na Tabela 45 os valores das sólidos iniciais das amostras de lodo e os sólidos do filtrado obtido após o processo de desaguamento. Por fim, apresentado também a eficiência de filtração obtida para cada ensaio realizado na estação piloto. Observa-se que a EF foi atingiu maiores valores com a concentração de lodo 22,03 g/L SST, superando 99%. Entretanto, ao atingir valores acima de 97,7%, a amostra de lodo de concentração 15,20 g/L SST também apresentou uma EF considerada ótima.

Tabela 45 Eficiência de filtração na estação piloto

Ensaio	SST do resíduo Inicial (%)	SST Final (%)	Eficiência de filtração (%)
1	1,520	0,035	97,70
2	1,520	0,030	98,03
3	1,520	0,025	98,36
4	2,203	0,011	99,50
5	2,203	0,0003	99,99
6	2,203	0,020	99,09

Fonte: Autor, 2024

Segundo Guanaes (2009), grandes partículas de SST presentes no resíduo, acabam ficando retidas na manta, passando a reter partículas cada vez menores, formando assim um sistema de pré filtração (*filter cake*), diminuindo a permeabilidade e aumentando a EF. A Figura 66 apresenta um exemplo da formação de *filter cake* nos ensaios da estação piloto.

Figura 66 *Filter cake* formado no ensaio na estação piloto



Fonte: Autor, 2024

Observa-se que, para o lodo de concentração 15,20 g/L SST, que a EF aumenta com o uso da manta geotêxtil, consequentemente diminuindo os valores de SST do filtrado. Já esse comportamento não se observa na outra amostra do lodo, variando os SST ao longo dos ensaios. Entretanto, nesta amostra, foram alcançados os maiores valores de EF. Uma hipótese a ser considerada é o uso dos polímeros aniônico e não iônico. Queiroz (2019) afirma que a dosagem e o tipo de polímero exercem um papel importante nos resultados da EF. A eficiência de filtração ficou acima de 97% em todos os ensaios realizados. Esses resultados chegaram a ficar acima de 99% na amostra com maior SST. Esses resultados são bem superiores aos mínimos afirmados por Christopher e Holtz (1985), ao afirmarem que para aplicações em sistemas de filtração, a EF deve ser acima de 75%. Silva (2019), Queiroz (2019), Ferreira & Vianna (2013) em trabalhos com diferentes materiais geotêxteis conseguiram valores de EF acima do mínimo preconizado ao usar diferentes dosagens de polímeros orgânicos. Já Myers & Elton (2011), em estudos sobre desaguamento em geotêxteis com resíduos gerados na mineração, não obtiveram resultados satisfatórios com o uso de polímeros. Entretanto, afirmam que se o processo de floculação é eficaz, a EF fica próxima a 100%.

Guanaes (2009) aponta a relação entre a EF de filtração e a remoção da turbidez. Segundo o autor, uma alta EF também apresenta altas taxas de remoção de turbidez no filtrado.

6. CONCLUSÃO

Com base no trabalho realizado e nos objetivos propostos, as seguintes conclusões específicas foram observadas:

- ✓ A proposta apresentada por este trabalho vem de encontro à melhoria do saneamento básico da população local, principalmente em relação às questões de saúde pública da população ribeirinha, através do tratamento do lodo gerado na ETA municipal. Como discutido ao longo do trabalho, são comuns os casos de doença de veiculação hídrica, em parte causados pelo consumo de água contaminada coletada sem tratamento diretamente no corpo hídrico. Desta forma, uma das conclusões deste trabalho é que os resultados obtidos com o tratamento do lodo permitem eliminar e/ou mitigar os impactos dessas doenças à população local através da manutenção da qualidade do Rio Taquari, destino deste resíduo após sua geração, além de eliminar os impactos ambientais gerados a partir do lançamento deste resíduo ao corpo hídrico.
- ✓ Quanto aos ensaios de adensamento com o uso de condicionantes químicos o IVL permitiu comparar três condicionantes químicos, quatro dosagens desses condicionantes, e a amostra em branco, totalizando 26 condições e 130 ensaios realizados. Todo esse processo permitiu escolher o melhor condicionante das duas amostras de lodo analisadas. Esta escolha garantiu que o polímero escolhido realizasse o melhor processo de sedimentação no tempo mais viável. Portanto, o IVL se mostrou um parâmetro adequado para os ensaios de adensamento em bancada das amostras analisadas.
- ✓ Os ensaios de desaguamento em bancada foram fundamentais para seleção de uma condição que permitiu realizar o escalonamento do volume para a estação piloto. Nos ensaios realizados com o volume inicial de 300 mL nas duas amostras de lodo, este apresentou uma taxa de filtração média de $0,2241 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ e um volume desaguado de 180 mL com o lodo de concentração 15,20 g/L SST. Ao se comparar com as taxas de filtração obtidas e com outros volumes durante os ensaios, essa quantidade com esta concentração de lodo, apresentou melhores condições experimentais para os ensaios na estação piloto.
- ✓ Quanto à estação piloto, está se apresentou como um projeto de execução e operação viável. E do ponto de vista financeiro, bastante atrativo graças aos

equipamentos de baixo custo. e financeira ao permitir um manejo fácil os materiais utilizados, de baixo custo. Durante o processo de desaguamento das duas amostras de lodo, foram obtidos os seguintes resultados ao fim do processo de desaguamento: para a amostra de lodo 15,20 g/L SST, a eficiência de filtração foi de 98%, a remoção de turbidez em 91,48%, a taxa de filtração em $0,2055 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ e o percentual de desaguamento 90,15%; já o lodo de concentração 22,03 g/L SST apresentou uma eficiência de filtração de 99,99%, a remoção de turbidez atingiu 88,97%, uma taxa de filtração de $0,2009 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, e percentual de desaguamento em 94,48%.

Em termos gerais, a estação piloto de desaguamento em manta geotêxtil instalada na ETA de Araguatins – TO para o tratamento do lodo gerado nesta estação é eficiente considerando valores obtidos para o percentual de desaguamento, eficiência de filtração e remoção de turbidez. A manta geotêxtil bidim, proposta tecnológica para o desaguamento de lodo usado neste trabalho, apresenta um custo inferior em comparação aos disponibilizadas hoje no mercado, como as centrífugas, filtro prensa e *bags* de desaguamento, tornando uma tecnologia viável para pequenos municípios e/ou ETA's onde não é possível a adoção de tecnologias mais robustas de tratamento deste resíduo. Ainda, ao adotar uma tecnologia de baixo custo, o custo desse serviço não será repassado na tarifa de água da população, isentando o aumento das contas de água, garantindo que o tratamento do lodo gerado na ETA seja realizado de forma sustentável.

7. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, têm-se as seguintes sugestões:

- ✓ Avaliar a associação do método das tecnologias analisadas a algum método de secagem natural para redução da umidade observada no resíduo retido pela manta.
- ✓ Realizar o levantamento de custo médio para implantação desta tecnologia em municípios que não adotam nenhum tratamento de resíduos gerados em ETA.
- ✓ Realizar os ensaios de desaguamento na estação piloto adotando o lodo gerado em estações de tratamento de esgoto como resíduo a ser tratado, verificando assim a viabilidade desta tecnologia para este tipo de resíduo.

REFERÊNCIAS

ACHON, L.; VALE, M. N. D. **ESTUDO DA APLICABILIDADE DE INDICADORES PARA GESTÃO DE RESÍDUOS GERADOS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA**. Cidades Verdes, São Paulo, 2016.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23th edition, Washington, USA, 2017.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22^a. ed. Washington, USA: [s.n.], 2012.

ANDRADE, D. L. **ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE BIOPOLÍMERO COMO COMPOSTO COADJUVANTE NO PROCESSO DE COAGULAÇÃO - FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO**, Sorocaba, Fevereiro 2017.

ASCE. **Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant**. Nova York: [s.n.], 1996.

BARRETO, C. G. **Avaliação de técnica alternativa para contenção da erosão: estudo de caso da Bacia do Rio Taquari, Araguatins - TO**, Palmas, 27 Fevereiro 2014.

BHATIA, S. K. **Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles**. [S.l.]: [s.n.], 2009.

BRAGA, M. G. **DUPLA FILTRAÇÃO EM FILTROS ASCENDENTES DE PEDREGULHO E FILTROS DESCENDENTES DE AREIA APLICADA À REMOÇÃO DE ALGAS: INFLUÊNCIA DA TAXA DE FILTRAÇÃO E GRANULOMETRIA DO FILTRO DE AREIA**. BRASÍLIA: UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2005.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília: Senado Federal, 1988.

BRASIL. **Diagnóstico Temático - Serviços de Água e Esgoto - Visão Geral 2021**. Ministério do Desenvolvimento Regional. Brasília. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução 357**. Março de 2005.

CAMILO C. CASTRO JIMENEZ; JULIO C. SALDARRIAGA MOLINA; EDWIN F. GARCÍA. **Physical-chemical characterisation of an alum-based water treatment sludge in different raw water turbidity scenarios**. Heliyon, Medellín, 2024.

CLIMATEMPO, 2023. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/581/araguatins-to>>. Acesso em: 01 Novembro 2024.

CORDEIRO,. **Micro propriedades de Lodos Gerenciados em Decantadores de Estações de Tratamento de Água**. Cancún: [s.n.], 2002.

COSTA, M. J. A. C.; DE LOIOLA, A. E. S. **DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DO RIO TAQUARI, ARAGUATINS-TO. Atlas da 12ª Jornada de Iniciação Científica e Extensão do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins**, Palmas, 1 Dezembro 2021.

CHRISTOPHER, B. R.; HOLTZ, R. D. **Geotextile engineering manual**. [s.l.]: U.S. Federal Highway Administration. 1985. 1044 p. (Report nº FHWA-TS-86/203)

CUNHA, F. **Estudo do comportamento hidráulico e da eficiência na decantação de alta taxa**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 1989.

DE CARVALHO, A. O.; ADAS, C. C. **Políticas Estaduais de Saneamento Básico na Ótica da Lei nº 11.445/2007**. In: JR., P.; JR., A. D. C. G. **Gestão do Saneamento Básico: Abastecimento de água e esgotamento sanitário**. Barueri, SP: Manole, 2012.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2°. ed. São Carlos: Rima, v. 1, 2005.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 3ª. ed. São Carlos, v.1, 2017.

DI BERNARDO, L.; S. BRANDÃO, C.; HELLER,. **Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

DROSTE, R. L. **Theory and practice of water and wastewater treatment**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc, , 1997.

FERRARI, N. et al. **ESTUDOS DE TRATABILIDADE DAS ÁGUAS DO RIO PARAÍBA DO SUL QUE ABASTECEM O MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS/SP**. Revista AIDIS De Ingeniería Y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo Y práctica, Coyoacán, Agosto 2012.

FERREIRA, B.O.; VIANNA, M.R. **Eficiência do desaguamento de lodos de decantadores e água de filtros de estação de tratamento de água através de filtros geotêxteis: estudo de caso**. 27º Congresso nacional da ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Goiânia, 2013.

FERREIRA, ; GOMES, F. B.; DANTAS, W. D. A. **Desafios e controvérsias do novo marco legal do saneamento básico no Brasil**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, jul. 2021. 20.

FERREIRA,. **OCORRÊNCIA DE FÁRMACOS E DESREGULADORES ENDÓCRINOS EM RESÍDUOS DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DO BOLONHA, BELÉM - PA**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2022.

FONTANA, A. O. **Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução do volume de lodo de decantadores e reuso de água de lavagem de filtros - estudo de caso - ETA Cardoso**. São Carlos: UFSCar, 2005.

FRATA, ; SIMÕES, M. M.; FARIAS , D. N. **OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PARA DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE SECAGEM NATURAL DO LODO DE ETA EM ESTUFA PILOTO**. REVISTA AIDIS, São Paulo, 06 Abril 2022.

FREIRE, A. L. **Saneamento básico: competências constitucionais para criar, organizar e prestar os serviços públicos**. Enciclopédia jurídica da PUC-SP, São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://enciclopediajuridica.pucsp.br/verbete/329/edicao-1/saneamento-basico:-competencias-constitucionais-para-criar,-organizar-e-prestar-os-servicos-publicos>>. Acesso em: 07 ago. 2023.

FREIRE, B. www.utfpr.edu.br. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2023. **Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. ABNT NBR 12209** Disponível em:<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/flaviofreire/saneamento/saneamento/SANE_07.pdf>. Acesso em: 16 Dezembro 2023.

FREIRE, O. D. S. **Estratégias institucionais de fomento à formação de profissionais na área ambiental**. 2. ed. São Paulo: Unesp, 1991. 84-8 p.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. IBGE. Brasília. 2017.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama das cidades brasileiras**. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/araguatins/panorama>>. Acesso em agosto de 2023. Censo 2022. Rio de Janeiro. 2022.

ISMAIL, I. A. L.; DI BERNARDO, L; DANTAS, A. D. B. **AVALIAÇÃO DO ADENSAMENTO POR GRAVIDADE DO LODO GERADO PELO TRATAMENTO DE ÁGUA**. Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, 2022.

JR, A. P.; GALVÃO, A. D. C. **Gestão do Saneamento Básico: Abastecimento de Água e esgotamento sanitário**. 1ª. ed. Barueri: Manole, 2012.

JÚNIOR, A. P. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. 2. ed. Barueri: Manole, v. 23, 2018. 980 p.

LASZLO MANOEL, J. ; ROCHA, P.C. **COMPOSIÇÃO HIERARQUICA DOS CANAIS FLUVIAIS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS AGUAPEÍ E PEIXE**. 10 SINAGEO - Geomorfologia, ambiente e sustentabilidade, Manaus, 2014.

LEITE, C. H. P.; MOITA NETO, ; LUZ BEZERRA,. **Novo marco legal do saneamento básico: alterações e perspectivas**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, Setembro 2022.

LEONETI, A. B.; PRADO, E. L.; BORGES DE OLIVEIRA, V. W. Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, MAR./ABR. 2011. 18.

LIMA , K. L. **AVALIAÇÃO DA FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE MANANCIAL COM BAIXA TURBIDEZ E COR ELEVADA**. Natal: [s.n.], 2019.

LOVO, A. **AVALIAÇÃO DO ADENSAMENTO POR GRAVIDADE E DO DESAGUAMENTO POR CENTRIFUGAÇÃO DO LODO GERADO PELO TRATAMENTO DE ÁGUA**. RIBEIRÃO PRETO: [s.n.], 2016.

MATTOS, M. R. ; GIRARD,. **Caracterização físico-química e ensaios de adensamento em coluna do lodo produzido em uma Estação de Tratamento de Água de grande porte**. Revista brasileira de ciências ambientais, Belém, Junho 2013.

MELLO, O. M. T. D. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS COM ELEVADAS CONCENTRAÇÕES DE ALGAS**. Brasília: UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 1998.

MELO, M. B. **Influência das micro e macropriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leito de drenagem**. São Carlos: USP, 2007.

MENEZES, C. D. **INVESTIGAÇÃO DE PROCESSOS OPERACIONAIS DE UMA ETAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CICLO COMPLETO**, Maceió, Fevereiro 2019.

MUTHUKUMARAN, A.; ILAMPARUTHI, K. **Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering**. [S.l.]: Geotextiles and Geomembranes, v. 24, 2006.

OLIVEIRA, M. D. D. et al. **Avaliação de fatores intervenientes no desempenho de estações de tratamento de água**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, Junho 2020.

OLIVEIRA, T.. **Tratamento de água para abastecimento público por sistema de separação por membrana de ultrafiltração: estudo de caso na ETA Alto da Boa Vista (São Paulo)**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

ORTIZ, I. G. **Avaliação da eficiência e do desaguamento de lodo de ETA em leito de drenagem utilizando diferentes geotêxteis e aplicação de polímero**. São Carlos: UFSCar, 2022.

PAULA, D. D. **Avaliação da dupla filtração para tratamento de água superficial utilizando filtração ascendente em areia grossa**. São Carlos: Escola de Engenharia da Universidade de São Carlos, 2003.

PEIXOTO, J. **Avaliação da Aplicação de Lodo de ETA no Adensador de Lodo de uma ETE de Lodos Ativados**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2008.

QUEIROZ, S. C. ; DI BERNARDO , D.; SILVA,. **Influência das características dos resíduos gerados no tratamento de água na eficiência do desaguamento em tubo geotêxtil**. Revista Departamento de Águas e Esgotos (DAE), São Paulo, 17 Dezembro 2019.

REALI, A. P. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

RICHTER, C. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Blucher, 2007.

RICHTER, C. A. **Água Métodos e tecnologias de tratamento**. 5°. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

ROLDÃO, A. D. ; FERREIRA, V. D.. **Climatologia do Estado do Tocantins – Brasil**. Caderno de Geografia, Uberlândia, Novembro 2019.

SATYAMURTHY, R.; BHATIA, S. K. **Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles**. Geosynthetics International, 2009. 83-96.

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DO ESTADO DO TOCANTINS, S. **ÁREAS DE USO LEGAL RESTRITO E POTENCIAIS À CONSERVAÇÃO AMBIENTAL**. SEPLAN. PALMAS, p. 44. 2012.

SECRETARIA DO PLANEJAMENTO E MEIO AMBIENTE, S. **Zoneamento Ecológico-Econômico. Estudo de Flora e Fauna do Norte do Estado do Tocantins**. Secretaria do Planejamento e Meio Ambiente. Palmas, p. 158. 2004.

SEPLAN, D. D. P. E. I. E. **PERFIL SOCIOECONÔMICO DOS MUNICÍPIOS DO TOCANTINS**. GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS. Palmas. 2017.

SILVA JUNIOR, et al. **Avaliação dos sistemas de reutilização da água de lavagem dos filtros de uma estação de tratamento de água: estudo de caso**. Revista Monografias Ambientais, Santa Maria , nov. 2014.

SILVA, G. **EFICIÊNCIA DO DESAGUAMENTO DE RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM TUBO GEOTÊXTIL**. Universidade de Ribeirão Preto. Ribeirão Preto, p. Tese de Doutorado. 2019.

SNIS, S. N. D. I. S. S. D. A. 2. SNIS - Série Histórica. **Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento**, 2021. Disponível em: <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>>. Acesso em: 15 Novembro 2023.

SOARES, S. R. A.; BERNARDES, ; NETTO, D. M. C. **Relações entre saneamento, saúde pública e meio ambiente: elementos para formulação de um modelo de planejamento em saneamento**. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, nov-dez 2002. 12.

SOUSA, R. S. D. et al. Água e saúde no município de Igarapé-Açu. **Saúde e Sociedade**, Castanhal, 01 Dezembro 2016. 13. Disponível em: <<https://scielosp.org/pdf/sausoc/2016.v25n4/1095-1107/pt>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

TALMAGE, W.P; FITCH, E.B. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. 1ª. ed. São Carlos: LDiBe, 1995.

TECHDUTO SOLUÇÕES. **Ficha técnica - Bidim GT 07**. SÃO PAULO: [s.n.], 2012.

TUNDISI, J. G. **CICLO HIDROLÓGICO E GERENCIAMENTO INTEGRADO**. Gestão das águas, 2003.

VISSCHER, J. T. **“Filtración en multiples etapas-FiME: bondades e limitaciones**. Santiago de Cali: Anais da Conferencia Internacional Mejoramiento de la Calidad del Agua, 1996.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

APÊNDICE A

Ensaio de adensamento em bancada

Tabela A 1 Ensaio de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST e dosagem de 0,5 mg pol./g SST do polímero aniônico

Ensaio de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da Interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	4	22,5	6	22,5	15	22,5	1	22,5	5
22	8	22	18	22	19	22	17	22	16
21,5	19	21,5	24	21,5	33	21,5	29	21,5	27
21	27	21	37	21	45	21	42	21	37
20,5	33	20,5	48	20,5	55	20,5	53	20,5	42
20	39	20	56	20	65	20	61	20	55
19,5	47	19,5	69	19,5	75	19,5	78	19,5	67
19	53	19	77	19	85	19	99	19	79
18,5	59	18,5	83	18,5	93	18,5	107	18,5	86
18	66	18	91	18	100	18	132	18	97
17,5	73	17,5	99	17,5	110	17,5	147	17,5	104
17	80	17	106	17	117	17	165	17	117
16,5	88	16,5	114	16,5	127	16,5	185	16,5	123
16	96	16	125	16	138	16	203	16	142
15,5	105	15,5	130	15,5	155	15,5	226	15,5	154
15	114	15	139	15	171	15	241	15	168
14,5	125	14,5	148	14,5	180	14,5	258	14,5	189

Continuação									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da Interface (cm)	Tempo (s)
14	134	14	156	14	188	14	282	14	203
13,5	148	13,5	167	13,5	197	13,5	311	13,5	212
13	160	13	179	13	207	13	350	13	224
12,5	171	12,5	191	12,5	220	12,5	388	12,5	233
12	186	12	204	12	230	12	433	12	247
11,5	203	11,5	220	11,5	247	11,5	481	11,5	262
11	219	11	242	11	268	11	549	11	281
10,5	238	10,5	263	10,5	292	10,5	609	10,5	306
10	257	10	289	10	324	10	667	10	337
9,5	281	9,5	317	9,5	359	9,5	722	9,5	377
9	297	9	344	9	394	9	812	9,0	417
8,5	323	8,5	378	8,5	439	8,5	901	8,5	470
8	358	8	418	8	486	8	958	8,0	525
7,5	394	7,5	465	7,5	540	7,5	1030	7,5	592
7	443	7	530	7	621	7	1170	7,0	692
6,5	496	6,5	602	6,5	714	6,5	1351	6,5	795
6	575	6	780	6	800	5,8	1510	6,3	1800
5,7	630	5,9	930	5,5	882	-	-	2,2	86400
-	-	-	-	5,4	961	-	-	IVL	18,02

Tabela A 2 Ensaio de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST e dosagem de 1,25 mg pol./g SST do polímero aniônico

Ensaio									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	9	22,5	9	22,5	10	22,5	2	22,5	2
22	15	22	12	22	15	22	8	22	9
21,5	21	21,5	26	21,5	25	21,5	22	21,5	31
21	30	21	45	21	37	21	32	21	42
20,5	37	20,5	53	20,5	54	20,5	50	20,5	60
20	45	20	64	20	67	20	62	20	75
19,5	50	19,5	68	19,5	82	19,5	74	19,5	81
19	58	19	77	19	91	19	96	19	93
18,5	63	18,5	83	18,5	113	18,5	107	18,5	111
18	73	18	94	18	128	18	122	18	120
17,5	79	17,5	99	17,5	138	17,5	137	17,5	129
17	86	17	108	17	153	17	144	17	138
16,5	94	16,5	116	16,5	169	16,5	154	16,5	152
16	102	16	124	16	184	16	166	16	171
15,5	110	15,5	132	15,5	193	15,5	174	15,5	181
15	120	15	142	15	210	15	184	15	200
14,5	128	14,5	148	14,5	227	14,5	194	14,5	210

Continuação									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da Interface (cm)	Tempo (s)
14	140	14	157	14	249	14	206	14	223
13,5	150	13,5	168	13,5	276	13,5	218	13,5	237
13	165	13	178	13	304	13	241	13	255
12,5	181	12,5	191	12,5	331	12,5	259	12,5	282
12	196	12	207	12	366	12	289	12	303
11,5	213	11,5	224	11,5	406	11,5	324	11,5	337
11	233	11	248	11	449	11	361	11	375
10,5	253	10,5	272	10,5	495	10,5	399	10,5	418
10	277	10	296	10	560	10	445	10	463
9,5	302	9,5	324	9,5	642	9,5	494	9,5	579
9	332	9	357	9	658	9	563	9	654
8,5	368	8,5	397	8,5	765	8,5	632	8,5	715
8	409	8	431	8	861	8	692	8	795
7,5	459	7,5	489	7,5	980	7,5	755	7,5	934
7	527	7	550	7	1135	7	898	7	1067
6,5	595	6,8	645	6,9	1335	6,7	1007	6,9	1200
4,9	645	-	-	-	-	-	-	6,4	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	1,9	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	18,30

Tabela A 3 Ensaio de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST e dosagem de 2,50 mg pol./g SST do polímero aniônico

Ensaio									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	12	22,5	12	22,5	12	22,5	15	22,5	17
22	22	22	22	22	19	22	37	22	36
21,5	31	21,5	42	21,5	28	21,5	48	21,5	48
21	40	21	52	21	48	21	59	21	61
20,5	52	20,5	63	20,5	60	20,5	63	20,5	73
20	61	20	72	20	68	20	81	20	85
19,5	73	19,5	84	19,5	76	19,5	87	19,5	94
19	84	19	93	19	85	19	111	19	107
18,5	97	18,5	105	18,5	98	18,5	129	18,5	117
18	108	18	115	18	110	18	148	18	131
17,5	120	17,5	126	17,5	119	17,5	159	17,5	140
17	131	17	135	17	127	17	169	17	152
16,5	144	16,5	147	16,5	139	16,5	179	16,5	164
16	156	16	158	16	147	16	192	16	175
15,5	171	15,5	169	15,5	162	15,5	205	15,5	185
15	183	15	178	15	171	15	220	15	195
14,5	197	14,5	192	14,5	182	14,5	238	14,5	208

Continuação									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
14	212	14	202	14	192	14	262	14	222
13,5	227	13,5	217	13,5	208	13,5	285	13,5	234
13	242	13	230	13	221	13	315	13	248
12,5	254	12,5	246	12,5	241	12,5	344	12,5	260
12	271	12	266	12	278	12	388	12	277
11,5	288	11,5	284	11,5	304	11,5	426	11,5	297
11	304	11	309	11	330	11	472	11	323
10,5	325	10,5	338	10,5	365	10,5	523	10,5	351
10	347	10	368	10	402	10	662	10	389
9,5	396	9,5	406	9,5	439	9,5	754	9,5	430
9	431	9	445	9	482	-	-	9	472
8,5	473	8,5	480	8,5	534	-	-	8,5	522
8	521	8	519	8	587	-	-	8	577
7,5	585	7,5	574	7,5	643	-	-	7,5	636
7	655	7	632	7	720	-	-	6,7	792
6,5	756	6,6	668	6,8	850	-	-	6,3	1800
6	884	-	-	-	-	-	-	4,9	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	18,02

Tabela A 4 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST e dosagem de 5,0 mg pol./g SST do polímero aniônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	4	22,5	2	22,5	4	22,5	8	22,5	7
22	7	22	5	22	8	22	16	22	17
21,5	11	21,5	12	21,5	16	21,5	24	21,5	26
21	12	21	19	21	25	21	34	21	40
20,5	16	20,5	26	20,5	35	20,5	44	20,5	50
20	17	20	33	20	45	20	52	20	62
19,5	23	19,5	41	19,5	52	19,5	61	19,5	72
19	26	19	49	19	63	19	72	19	83
18,5	30	18,5	57	18,5	72	18,5	79	18,5	96
18	35	18	64	18	82	18	89	18	106
17,5	39	17,5	73	17,5	111	17,5	98	17,5	118
17	45	17	81	17	120	17	109	17	130
16,5	48	16,5	89	16,5	130	16,5	120	16,5	139
16	53	16	97	16	142	16	134	16	153
15,5	59	15,5	105	15,5	152	15,5	146	15,5	164
15	62	15	113	15	162	15	160	15	178

Continuação									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
14,5	66	14,5	120	14,5	174	14,5	175	14,5	191
14	71	14	128	14	189	14	189	14	208
13,5	79	13,5	137	13,5	201	13,5	207	13,5	223
13	84	13	146	13	215	13	222	13	241
12,5	92	12,5	155	12,5	227	12,5	239	12,5	258
12	98	12	166	12	246	12	257	12	283
11,5	107	11,5	177	11,5	258	11,5	277	11,5	303
11	115	11	191	11	278	11	296	11	328
10,5	126	10,5	204	10,5	304	10,5	319	10,5	350
10	138	10	222	10	327	10	350	10	382
9,5	151	9,5	243	9,5	357	9,5	375	9,5	408
9	166	9	264	9	395	9	412	9	448
8,5	189	8,5	291	8,5	442	8,5	456	8,5	490
8	222	8	330	8	513	8	525	8	549
7,5	272	7,5	366	6,9	585	7,5	601	7,5	617
7	317	7	420	6,8	677	-	-	7	690
6,5	362	6,6	560	-	-	-	-	6,5	1017
6	450	-	-	-	-	-	-	6	1350

Continuação									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
-	-	-	-	-	-	-	-	5,5	1559
-	-	-	-	-	-	-	-	5,1	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	4	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	14,58

Tabela A 5 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST e dosagem de 0,5 mg pol./g SST do polímero não iônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	tempo (s)	Altura da interface (cm)	tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	85	22,5	172	22,5	151	22,5	179	22,5	93
22	515	22	840	22	710	22	721	22	363
-	-	-	-	-	-	-	-	21,5	1033
-	-	-	-	-	-	-	-	21	1529
-	-	-	-	-	-	-	-	20,8	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	12,5	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	59,50

Tabela A 6 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST e dosagem de 1,25 mg pol./g SST do polímero não iônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	941	22,5	797	22,5	699	22,5	760	22,5	523
-	-	-	-	-	-	-	-	22	1413
-	-	-	-	-	-	-	-	21,8	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	10,5	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	62,36

Tabela A 7 Ensaio de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST e dosagem de 2,50 mg pol./g SST do polímero não iônico

Ensaio de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	4	22,5	3	22,5	3	22,5	14	22,5	20
22	6	22	11	22	21	22	23	22	26
21,5	10	21,5	20	21,5	55	21,5	60	21,5	46
21	15	21	33	21	83	21	91	21	59
20,5	24	20,5	46	20,5	115	20,5	125	20,5	82
20	32	20	64	20	145	20	159	20	101
19,5	43	19,5	80	19,5	178	19,5	201	19,5	117
19	55	19	103	19	215	19	241	19	140
18,5	66	18,5	126	18,5	249	18,5	285	18,5	163
18	78	18	151	18	282	18	324	18	191
17,5	89	17,5	175	17,5	323	17,5	379	17,5	231
17	102	17	206	17	361	17	421	17	269
16,5	116	16,5	234	16,5	405	16,5	470	16,5	320
16	131	16	264	16	444	16	518	16	383
15,5	150	15,5	307	15,5	493	15,5	585	15,5	444
15	166	15	336	15	540	15	627	15	511
14,5	189	14,5	379	14,5	596	14,5	684	14,5	585

Continuação									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
14	207	14	414	14	639	14	740	14	665
13,5	230	13,5	457	13,5	694	13,5	800	13,5	753
13	255	13	499	13	744	13	843	13	979
12,5	287	12,5	552	12,5	805	12,5	885	12,5	1070
12	335	12	599	12	860	-	-	12	1141
11,5	363	11,5	657	11,5	915	-	-	11,5	1235
11	382	11	729	-	-	-	-	11	1375
10,5	454	-	-	-	-	-	-	10,5	1450
10	586	-	-	-	-	-	-	10	1577
-	-	-	-	-	-	-	-	9,5	1680
-	-	-	-	-	-	-	-	9	1750
-	-	-	-	-	-	-	-	8,7	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	5,5	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	24,89

Tabela A 8 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST e dosagem de 5,0 mg pol./g SST do polímero não iônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	2	22,5	4	22,5	3	22,5	7	22,5	7
22	3	22	7	22	4	22	14	22	14
21,5	6	21,5	35	21,5	29	21,5	28	21,5	35
21	7	21	50	21	44	21	41	21	57
20,5	12	20,5	65	20,5	61	20,5	59	20,5	80
20	17	20	88	20	85	20	79	20	104
19,5	31	19,5	104	19,5	112	19,5	100	19,5	133
19	39	19	120	19	139	19	123	19	154
18,5	45	18,5	137	18,5	167	18,5	148	18,5	190
18	56	18	159	18	199	18	174	18	225
17,5	66	17,5	177	17,5	233	17,5	203	17,5	255
17	78	17	191	17	266	17	234	17	289
16,5	93	16,5	213	16,5	301	16,5	276	16,5	332
16	125	16	237	16	340	16	315	16	368
15,5	140	15,5	259	15,5	384	15,5	358	15,5	416
15	240	15	285	15	432	15	396	15	452
14,5	330	14,5	310	14,5	464	14,5	438	14,5	509

Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
14	393	14	346	14	555	14	483	14	551
13,5	460	13,5	396	13,5	590	13,5	532	13,5	594
13	518	13	449	13	630	13	572	13	645
12,5	657	12,5	504	12,5	670	12,5	624	12,5	703
-	-	12	587	12	722	12	663	12	750
-	-	11,5	646	11,5	800	11,5	750	11,5	789
-	-	-	-	11	930	11	820	11	821
-	-	-	-	-	-	10,5	959	10,5	894
-	-	-	-	-	-	-	-	10	965
-	-	-	-	-	-	-	-	9,5	1001
-	-	-	-	-	-	-	-	9	1034
-	-	-	-	-	-	-	-	8,5	1205
-	-	-	-	-	-	-	-	8	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	7	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	22,89

Tabela A 9 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST e dosagem de 0,5 mg pol./g SST do polímero catiônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da Interface (cm)	Tempo (s)	Altura da Interface (cm)	Tempo (s)	Altura da Interface (cm)	Tempo (s)	Altura da Interface (cm)	Tempo (s)	Altura da Interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	542	22,5	510	22,5	670	22,5	423	22,5	370
22	1198	22	1040	22	1319	22	1150	22	943
-	-	-	-	-	-	-	-	21,5	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	12,5	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	61,50

Tabela A 10 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST e dosagem de 1,25 mg pol./g SST do polímero catiônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	299	22,5	61	22,5	95	22,5	70	22,5	62
22	538	22	170	22	303	22	210	22	280
21,5	960	21,5	632	21,5	665	21,5	435	21,5	599
-	-	21	930	21	980	21	1030	21	874
-	-	20,5	1230	20,5	1323	20,6	1390	20,5	1223
-	-	-	-	-	-	-	-	19,8	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	13	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	56,64

Tabela A 11 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST e dosagem de 2,50 mg pol./g SST do polímero catiônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface(cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da Interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da Interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	585	22,5	552	22,5	608	22,5	620	22,5	637
22	1134	22	1075	22	1140	22	1141	22	1295
-	-	-	-	-	-	-	-	21,7	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	18,4	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	62,07

Tabela A 12 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 15,20 g/L SST e dosagem de 5,0 mg pol./g SST do polímero catiônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	29	22,5	210	22,5	3	22,5	9	22,5	16
22	100	22	469	22	13	22	39	22	82
21,5	198	21,5	788	21,5	21	21,5	62	21,5	146
21	306	21	943	21	35	21	91	21	228
20,5	520	-	-	20,5	50	20,5	113	20,5	256
20	686	-	-	20	67	20	147	20	384
19,5	925	-	-	19,5	90	19,5	179	19,5	439
-	-	-	-	19	112	19	222	19	556
-	-	-	-	18,5	136	18,5	252	18,5	610
-	-	-	-	18	157	18	302	18	667
-	-	-	-	17,5	180	17,5	348	17,5	779
-	-	-	-	17	208	17	403	17	845
-	-	-	-	16,5	231	16,5	457	16,5	927
-	-	-	-	16	261	16	506	16	976
-	-	-	-	15,5	287	15,5	574	15,5	1114
-	-	-	-	15	322	15	643	15	1177
-	-	-	-	14,5	352	14,5	703	14,5	1281

Continuação									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
-	-	-	-	14	393	14	765	14	1347
-	-	-	-	13,5	437	13,5	838	13,5	1448
-	-	-	-	13	498	-	-	12,5	1800
-	-	-	-	12,5	558	-	-	9,3	86400
-	-	-	-	12	637	-	-	-	-
-	-	-	-	11,5	738	-	-	-	-
-	-	-	-	11	935	-	-	IVL	35,76

Tabela A 13 Ensaio de adensamento da amostra em branco com o lodo de concentração 15,20 g/L SST

Ensaio de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da Interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	39	22,5	42	22,5	45	22,5	37	22,5	21,9
22	117	22	125	22	133	22	111	22	95
21,5	171	21,5	183	21,5	194	21,5	163	21,5	144
21	260	21	279	21	296	21	249	21	190
20,5	393	20,5	421	20,5	447	20,5	375	20,5	289
20	567	20	608	20	644	20	541	20	450
19,5	925	19,5	993	19,5	1052	19,5	883	19,5	660
19	1240	19	1330	19	1409	19	1183	19	988
18,5	1451	18,5	1529	18,5	1578	18,5	1775	18,5	1136
18	1490	-	-	18	1767	-	-	18	1307
17,5	1580	-	-	17,5	1979	-	-	17,5	1503
17	1710	-	-	-	-	-	-	17,3	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	49,49

Tabela A 14 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e dosagem de 0,5 mg pol./g SST do polímero aniônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	197	22,5	110	22,5	85	22,5	31	22,5	23
22	485	22	290	22	183	22	96	22	51
21,6	697	21,5	504	21,5	334	21,5	173	21,5	116
-	-	21	685	21	518	21	294	21	182
-	-	20,6	784	20,5	689	20,5	428	20,5	287
-	-	-	-	20	1002	20	627	20	443
-	-	-	-	-	-	19,6	726	19,5	598
-	-	-	-	-	-	-	-	19	848
-	-	-	-	-	-	-	-	18,5	1100
-	-	-	-	-	-	-	-	18	1344
-	-	-	-	-	-	-	-	17,5	1770
-	-	-	-	-	-	-	-	17,5	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	12,7	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	34,52

Tabela A 15 Ensaio de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e dosagem de 1,25 mg pol./g SST do polímero aniônico

Ensaio de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	321	22,5	327	22,5	299	22,5	370	22,5	1044
22	681	22	772	22	733	22	760	22	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	14,8	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	61,49

Tabela A 16 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e dosagem de 2,50 mg pol./g SST do polímero aniônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	4	22,5	4	22,5	2	22,5	3	22,5	5
22	38	22	25	22	53	22	210	22	243
21,5	92	21,5	66	21,5	129	21,5	534	21,5	562
21	225	21	131	21	270	21	668	21	931
20,5	386	20,5	246	20,5	417	-	-	20,5	1375
20	502	20	322	20	576	-	-	20	1800
19,5	731	19,5	427	19,5	786	-	-	13,45	86400
-	-	19	565	19	897	-	-	-	-
-	-	18,5	748	-	-	-	-	-	-
-	-	18	831	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	39,45

Tabela A 17 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e dosagem de 5,0 mg pol./g SST do polímero aniônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	2	22,5	2	22,5	2	22,5	8	22,5	6
22	9	22	7	22	21	22	148	22	8
21,5	21	21,5	32	21,5	72	21,5	236	21,5	31
21	33	21	63	21	108	21	347	21	61
20,5	54	20,5	96	20,5	164	20,5	454	20,5	92
20	79	20	159	20	195	20	540	20	106
19,5	140	19,5	240	19,5	248	19,6	600	19,5	142
19	223	19	346	19	302	-	-	19	174
18,5	349	18,5	371	18,5	333	-	-	18,5	194
18	568	18	463	18	378	-	-	18	214
-	-	17,5	483	17,5	432	-	-	17,5	247
-	-	17	563	17	504	-	-	17	264
-	-	16,5	600	16,5	560	-	-	16,5	290
-	-	-	-	-	-	-	-	16	326
-	-	-	-	-	-	-	-	15,5	382
-	-	-	-	-	-	-	-	15	437
-	-	-	-	-	-	-	-	14,5	519

Continuação									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
-	-	-	-	-	-	-	-	14	631
-	-	-	-	-	-	-	-	13,5	1114
-	-	-	-	-	-	-	-	13	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	11,8	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	25,64

Tabela A 18 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e dosagem de 0,5 mg pol./g SST do polímero não iônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	8	22,5	15	22,5	56	22,5	20	22,5	21
22	19	22	83	22	157	22	73	22	78
21,5	35	21,5	162	21,5	243	21,5	125	21,5	146
21	53	21	218	21	317	21	180	21	191
20,5	71	20,5	297	20,5	395	20,5	232	20,5	245
20	93	20	353	20	461	20	295	20	310
19,5	115	19,5	423	19,5	539	19,5	353	19,5	370
19	136	19	484	19	612	19	429	19	439
18,5	161	18,5	554	18,5	680	18,5	496	18,5	511
18	185	18	624	18	760	18	579	18	589
17,5	212	17,5	688	-	-	17,5	660	17,5	668
17	238	17	755	-	-	-	-	17	751
16,5	266	16,5	874	-	-	-	-	16,5	832
16	286	16	931	-	-	-	-	16	919
15,5	311	15,5	1005	-	-	-	-	15,5	1010
15	334	15	1070	-	-	-	-	15	1092

Continuação									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
14,5	364	14,5	1140	-	-	-	-	14,5	1188
14	394	14	1208	-	-	-	-	14	1282
13,5	431	-	-	-	-	-	-	13,5	1386
13	476	-	-	-	-	-	-	13	1498
12,5	523	-	-	-	-	-	-	12,5	1620
12	589	-	-	-	-	-	-	12	1800
11,5	666	-	-	-	-	-	-	6	86400
11	758	-	-	-	-	-	-	-	-
10,5	922	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1058	-	-	-	-	-	-	-	-
9,5	1253	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	34,32

Tabela A 19 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e dosagem de 1,25 mg pol./g SST do polímero não iônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	1	22,5	14	22,5	10	22,5	13	22,5	14
22	2	22	86	22	68	22	129	22	55
21,5	7	21,5	177	21,5	141	21,5	204	21,5	136
21	26	21	209	21	245	21	329	21	220
20,5	48	20,5	290	20,5	332	20,5	453	20,5	325
20	66	20	312	20	441	20	544	20	380
19,5	94	19,5	475	19,5	527	19,5	657	19,5	482
19	110	19	529	19	618	19	748	19	580
18,5	127	18,5	611	18,5	744	18,5	831	18,5	688
18	155	18	683	18	820	18	917	18	783
17,5	182	17,5	759	-	-	-	-	17,5	895
17	202	17	855	-	-	-	-	17	1007
16,5	262	16,5	928	-	-	-	-	16,5	1110
16	344	16	1014	-	-	-	-	16	1210
15,5	464	15,5	1121	-	-	-	-	15,5	1326
15	653	15	1221	-	-	-	-	15	1442

Continuação									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
14,5	863	-	-	-	-	-	-	14,5	1606
14	973			-				14	1677
-	-			-				13,5	1766
-	-			-				13,4	1800
-	-			-				11	86400
-	-			-				IVL	26,43

Tabela A 20 Ensaio de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e dosagem de 2,5 mg pol./g SST do polímero não iônico

Ensaio de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	3	22,5	3	22,5	7	22,5	47	22,5	67
22	8	22	15	22	26	22	99	22	150
21,5	29	21,5	32	21,5	43	21,5	137	21,5	221
21	96	21	55	21	68	21	179	21	285
20,5	164	20,5	86	20,5	92	20,5	218	20,5	356
20	203	20	126	20	123	20	268	20	428
19,5	256	19,5	160	19,5	152	19,5	315	19,5	480
19	468	19	225	19	193	19	685	19	548
18,5	661	18,5	323	18,5	231	18,5	457	18,5	598
-	-	18	530	18	282	18	564	18	722
-	-	17,5	640	17,5	348	17,5	640	17,5	830
-	-	-	-	17	431	-	-	17	927
-	-	-	-	16,5	507	-	-	16,5	1043
-	-	-	-	16	614	-	-	16	1202
-	-	-	-	-	-	-	-	15,5	1430
-	-	-	-	-	-	-	-	15	1607
-	-	-	-	-	-	-	-	14,5	1710

Continuação									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
-	-	-	-	-	-	-	-	14,1	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	10,7	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	27,81

Tabela A 21 Ensaios de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e dosagem de 5,0 mg pol./g SST do polímero não iônico

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface(cm)	Tempo (s)	Altura da interface(cm)	Tempo (s)	Altura da interface(cm)	Tempo (s)	Altura da interface(cm)	Tempo (s)	Altura da interface(cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	2	22,5	4	22,5	3	22,5	8	22	17
22	3	22	8	22	4	22	16	21,5	42
21,5	7	21,5	39	21,5	32	21,5	32	21	68
21	8	21	55	21	48	21	47	20,5	96
20,5	13	20,5	72	20,5	67	20,5	68	20	125
20	19	20	97	20	94	20	91	19,5	160
19,5	34	19,5	114	19,5	123	19,5	115	19	185
19	43	19	132	19	153	19	141	18,5	228
18,5	50	18,5	151	18,5	184	18,5	170	18	270
18	62	18	175	18	219	18	200	17,5	306
17,5	73	17,5	195	17,5	256	17,5	233	17	347
17	86	17	210	17	293	17	269	16,5	398
16,5	102	16,5	234	16,5	331	16,5	317	16	442
16	138	16	261	16	374	16	362	15,5	499
15,5	154	15,5	285	15,5	422	15,5	412	15	542
15	264	15	314	15	475	15	455	14,5	611
14,5	363	14,5	341	14,5	510	14,5	504	14	661

Continuação									
1		2		3		4		5	
Altura da interface(cm)	Tempo (s)	Altura da interface(cm)	Tempo (s)	Altura da interface(cm)	Altura da interface(cm)	Tempo (s)	Altura da interface(cm)	Tempo (s)	Altura da interface(cm)
14	432	14	381	14	611	14	555	13,5	713
13,5	506	13,5	436	13,5	649	13,5	612	13	774
13	570	13	494	13	693	13	658	12,5	844
12,5	723	12,5	554	12,5	737	12,5	718	12	900
-	-	12	646	12	794	12	762	11,5	947
-	-	11,5	711	11,5	880	11,5	863	11	985
-	-	-	-	11	1023	11	943	10,5	1073
-	-	-	-	-	-	-	-	10	1158
-	-	-	-	-	-	-	-	9,7	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	8,7	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	19,13

Tabela A 22 Ensaio de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e dosagem de 0,5 mg pol./g SST do polímero catiônico

Ensaio de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	520	22,5	610	22,5	668	22,5	919	22,6	1800
22	895	22	915	22	888	22	1050	22	2400
-	-	-	-	-	-	-	-	18,1	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	44,58

Tabela A 23 Ensaio de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e dosagem de 1,25 mg pol./g SST do polímero catiônico

Ensaio de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	428	22,5	584	22,5	678	22,5	502	22,5	641
22	581	22	997	22	844	22	1060	22	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	13,5	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	43,40

Tabela A 24 Ensaio de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e dosagem de 2,5 mg pol./g SST do polímero catiônico

Ensaio de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	130	22,5	104	22,5	79	22,5	99	22,5	91
22	343	22	343	22	539	22	478	22	503
21,5	548	21,5	596	21,5	893	21,5	845	21,5	655
21	747	21	857	21	1002	21	1100	21	936
20,5	955	-	-	-	-	-	-	20,5	1800
20	1233	-	-	-	-	-	-	12	86400
19,5	1494	-	-	-	-	-	-	-	-
19	1778	-	-	-	-	-	-	IVL	55,77

Tabela A 25 Ensaio de adensamento com o lodo de concentração 22,03 g/L SST e dosagem de 5,0 mg pol./g SST do polímero catiônico

Ensaio de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
23	0	23	0	23	0	23	0	23	0
22,5	8	22,5	8	22,5	21	22,5	4	22,5	48
22	55	22	17	22	114	22	25	22	102
21,5	132	21,5	59	21,5	219	21,5	65	21,5	183
21	231	21	164	21	345	21	135	21	280
20,5	387	20,5	290	20,5	501	20,5	206	20,5	383
20	653	20	515	20	650	20	346	20	547
19,5	789	19,5	836	19,5	815	19,5	572	19,5	761
-	-	-	-	-	-	-	-	19	1069
-	-	-	-	-	-	-	-	18,5	1449
-	-	-	-	-	-	-	-	18	1800
-	-	-	-	-	-	-	-	11,7	86400
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	35,51

Tabela A 26 Ensaios de adensamento da amostra em branco com o lodo de concentração 22,03 g/L SST

Ensaios de adensamento									
1		2		3		4		5	
Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)	Altura da interface (cm)	Tempo (s)
0	23	0	23	0	23	0	23	0	23
28	22,5	24	22,5	19	22,5	19	22,5	22	22,5
74	22	63	22	51	22	50	22	57	22
193	21,5	164	21,5	131	21,5	129	21,5	148	21,5
271	21	230	21	185	21	181	21	208	21
457	20,5	388	20,5	312	20,5	305	20,5	350	20,5
873	20	741	20	595	20	582	20	668	20
1046	19,5	887	19,5	713	19,5	697	19,5	885	19,5
1150	19	1085	19	1125	19	-	-	1245	19
-	-	-	-	1255	18,5	-	-	1800	17,9
-	-	-	-	-	-	-	-	IVL	43,20

APÊNDICE B

Ensaio de desaguamento em bancada

Tabela B 1 Ensaio de desaguamento com o lodo 15,20 g/L SST e volume de 100 mL

Ensaio de desaguamento					
1		2		3	
Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)
30	55	30	19	30	12
60	56	60	30	60	19
90	57	90	40	90	25
120	57	120	48	120	30
-	-	150	53	150	32
-	-	180	55	180	36
-	-	210	58	210	42
-	-	240	60	240	45
-	-	270	61	270	50
-	-	-	-	300	52
-	-	-	-	330	56
-	-	-	-	360	58

Tabela B 2 Ensaio de desaguamento com o lodo 15,20 g/L SST e volume de 200 mL

Ensaio de desaguamento					
1		2		3	
Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)
30	130	30	120	30	138
60	150	60	135	60	158
90	165	90	160	90	172
120	170	120	170	120	186
150	175	150	178	150	192
180	180	180	186	180	196
210	185	210	192	210	198
240	190	240	192	-	-
-	-	260	194	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

Tabela B 3 Ensaio de desaguamento com o lodo 15,20 g/L SST e volume de 300 mL

Ensaio de desaguamento					
1		2		3	
Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)
30	220	30	180	30	245
60	230	60	195	60	250
90	240	90	210	90	255
120	245	120	218	120	260
150	250	150	225	150	265
180	255	180	230	180	267
210	260	210	237	210	270
240	265	240	240	240	272
270	270	270	248	270	275
300	275	300	250	300	276
330	280	330	255	-	-
360	283	360	260	-	-
390	285	390	264	-	-
420	287	420	267	-	-
450	290	450	270	-	-
480	292	480	272	-	-
510	295	510	275	-	-
-	-	540	280	-	-
-	-	570	282	-	-
-	-	600	285	-	-
-	-	630	288	-	-

Tabela B 4 Ensaio de desaguamento com o lodo 15,20 g/L SST e volume de 400 mL

Ensaio de desaguamento					
1		2		3	
Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)
30	380	30	190	30	250
60	390	60	208	60	272
90	398	90	220	90	285
120	399	120	230	120	290
-	-	150	235	150	295
-	-	180	240	180	300
-	-	210	245	210	305
-	-	240	250	240	310
-	-	270	255	270	315
-	-	300	260	300	320
-	-	330	263	330	325
-	-	360	272	360	327
-	-	390	275	390	330
-	-	420	277	420	336
-	-	450	280	450	340
-	-	480	282	480	342
-	-	510	285	510	345
-	-	540	290	540	350
-	-	570	292	570	352
-	-	600	295	600	355
-	-	630	298	630	357
-	-	660	300	660	359
-	-	690	302	690	360
-	-	720	306	720	362
-	-	750	308	750	364
-	-	780	310	780	366
-	-	810	312	810	367
-	-	840	315	840	369
-	-	870	320	870	370
-	-	900	322	-	-
-	-	930	324	-	-
-	-	960	325	-	-
-	-	990	329	-	-
-	-	1020	330	-	-

Continuação					
Ensaio de desaguamento					
Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)
1		2		3	
-	-	1050	332	-	-
-	-	1080	334	-	-
-	-	1110	336	-	-

Tabela B 5 Ensaio de desaguamento com o lodo 15,20 g/L SST e volume de 500 ml

Ensaio de desaguamento					
1		2		3	
Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)	Tempo (s)	Volume (mL)
30	100	30	99	30	99
60	105	60	105	60	102
90	107	90	111	90	105
120	110	120	113	120	110
150	113	150	115	150	112
300	113	180	116	180	115
-	-	300	117	300	116

APÊNDICE C

Ensaio de desagamento em bancada para o volume de 300 mL

Tabela C 1 Resultados dos ensaios de desaguamento para o volume de 300 mL - 1ª rodada com 100 mL
Concentração de lodo 15,20 g/L SST

Tempo (s)	Volume (mL)	Taxa de filtração $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
0	0	0
30	55	3,361352
60	56	1,711234
90	57	1,161194
120	57	0,870896

Tabela C 2 Resultados dos ensaios de desaguamento para o volume de 300 mL - 2ª rodada com 100 mL
Concentração de lodo 15,20 g/L SST

Tempo (s)	Volume (mL)	Taxa de filtração $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
0	0	0
30	19	1,16119446
60	30	0,91673247
90	40	0,81487331
120	48	0,73338598
150	53	0,64782428
180	55	0,5602254
210	58	0,50638556
240	60	0,45836624
270	61	0,41422727

Tabela C 3 Resultados dos ensaios de desaguamento para o volume de 300 mL - 3ª rodada com 100 mL
Concentração de lodo 15,20 g/L SST

Tempo (s)	Volume (mL)	Taxa de filtração $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
0	0	0
30	12	0,733386
60	19	0,580597
90	25	0,509296
120	30	0,458366
150	32	0,391139
180	36	0,366693
210	42	0,366693
240	45	0,343775
270	50	0,339531
300	52	0,317801
330	56	0,311133
360	58	0,295392

Tabela C 4 Resultados dos ensaios de desaguamento para o volume de 300 mL em batelada
Concentração de lodo 15,20 g/L SST

Tempo (s)	Volume (mL)	Taxa de filtração $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
0	0	0
30	11	0,660047
60	13	0,403362
90	18	0,366693
120	19	0,293354
150	20	0,249351
180	23	0,232239
210	25	0,220016
240	25	0,192514
270	26	0,179272
300	29	0,176013
330	30	0,166679
360	31	0,1589
390	33	0,154011
420	34	0,148118
450	37	0,151566
480	38	0,144385
510	38	0,138049
540	40	0,134454
570	42	0,135097
600	43	0,132009

Tabela C 5 Resultados dos ensaios de desaguamento para o volume de 300 mL - 1ª rodada com 100 mL
Concentração de lodo 22,03 g/L SST

Tempo (s)	Volume (mL)	Taxa de filtração $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
0	0	0
30	55	3,361352
60	64	1,955696
90	67	1,364913
120	72	1,100079
150	75	0,916732

Tabela C 6 Resultados dos ensaios de desaguamento para o volume de 300 mL - 2ª rodada com 100 mL
Concentração de lodo 22,03 g/L SST

Tempo (s)	Volume (mL)	Taxa de filtração $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
0	0	0
30	14	0,855617
60	18	0,550039
90	28	0,570411
120	33	0,504203
150	37	0,452255
180	40	0,407437
210	42	0,366693
240	46	0,351414
270	48	0,325949
300	50	0,305577
330	53	0,294466
360	55	0,280113
390	55	0,258566

Tabela C 7 Resultados dos ensaios de desaguamento para o volume de 300 mL - 3ª rodada com 100 mL
Concentração de lodo 22,03 g/L SST

Tempo (s)	Volume (mL)	Taxa de filtração $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
0	0	0
30	10	0,611155
60	16	0,488924
90	21	0,427808
120	25	0,381972
150	29	0,35447
180	32	0,325949
210	34	0,296847
240	36	0,27502
270	39	0,264834
300	42	0,256685
330	44	0,244462
360	46	0,234276
390	48	0,225657
420	49	0,213904

Tabela C 8 Resultados dos ensaios de desaguamento para o volume de 300 mL em batelada
Concentração de lodo 22,03 g/L SST

Tempo (s)	Volume (mL)	Taxa de filtração $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
0	0	0
30	7	0,427808
60	9	0,27502
90	11	0,22409
120	14	0,213904
150	16	0,19557
180	19	0,193532
210	21	0,183346
240	22	0,168068
270	24	0,162975
300	26	0,1589
330	27	0,150011
360	28	0,142603
390	30	0,141036
420	32	0,139693
450	33	0,134454
480	35	0,13369
510	36	0,129421
540	37	0,125626
570	37	0,119014

APÊNDICE D

Resultados da água bruta

Tabela D 1 Resultados dos parâmetros da água bruta

Parâmetros	Unidade	nov/2023	abr/2024	mai/2024	jun/2024	jul/2024
pH	-	6,76	6,57	6,62	6,82	6,56
Turbidez	uT	6,56	12,6	11,5	5,36	3,44
DQO	mg/L	16	-	-	-	-
COT	mg/L	1,956	1,831	1,693	1,465	1,419
Ferro	mg/L	0,74	0,33	0,71	0,25	0,38
Alumínio	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

ANEXO A

Informações Técnicas do Polímero Sintético Catiônico, Aniônico e Não Aniônico

CERTIFICADO DE QUALIDADE

DADOS REFERENTES AO CLIENTE

Empresa Solicitante: UNAERP

DADOS REFERENTES AO PRODUTO

Nome do Produto: ART FLOC 3530

Data de Fabricação: 10/11/2023

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Análises Físico-Químicas	Especificações	Resultados
Densidade	1,00 ± 0,10	1,03 g/cm³
Cor	Branco	OK
Carga	Catiônico	OK
Odor	Característico Alifático	OK
Aparência	Emulsão Branco Leitoso	OK
Estabilidade	Totalmente Estável	OK
Validade	200 dias	OK

RESPONSÁVEL DE CONTROLE DE QUALIDADE

Diretor Industrial	Oscar Kunio Sato	CRQ: 04116867 - IV Região
Engenheira Química	Liliane Maximiano de Almeida	CRQ: 04369249 - IV Região
Técnico de Laboratório	Givanildo Anselmo Rossatelli	CRQ: 04491857 - IV Região

Jardinópolis, 10 de novembro de 2023

Liliane M. de Almeida
RESPONSÁVEL TÉCNICO

 ARATROP NORDESTE ART – BT - 16	BOLETIM TÉCNICO DO PRODUTO ART FLOC 3530 (POLIELETRÓLITO)	Telefone de emergência (16)3690-1100
--	--	---

O **ART FLOC 3530** é um polieletrólito em emulsão de alto peso molecular, alta eficiência, que oferece grande versatilidade em sua utilização para o tratamento de água, efluentes e os mais diversos processos industriais.

O **ART FLOC 3530** proporciona a formação de flocos grandes e densos, o que permite uma decantação/flotação rápida e completa.

Os principais benefícios que a utilização do polímero **ART FLOC 3530** apresenta são:

- Otimização dos equipamentos de processo.
- Melhora acentuada na turbidez do líquido tratado.
- Maior facilidade na remoção de cor orgânica.
- Redução no volume de produtos químicos manuseados.
- Maior facilidade na preparação e aplicação dos produtos químicos.
- Redução no custo do tratamento.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO/QUÍMICAS:

Aspecto: Emulsão branca leitosa
 Densidade: $1,00 \pm 0,10 \text{ g/cm}^3$
 Carga iônica: Catiônica

DOSAGEM:

A dosagem ideal do **ART FLOC 3530** será determinada após realização de testes específicos. Recomendamos como dosagem orientativa de 0,5 a 2,0 ppm para clarificação de 2,0 a 10,0 ppm para filtração do lodo.

APLICAÇÃO:

O **ART FLOC 3530** deve ser aplicado em solução aquosa utilizando água com temperatura entre 10 e 30°C. Adicionar metade do volume da água necessária ou até que o agitador fique submerso, ligar a agitação e dosar o polímero lentamente, mantendo a agitação em no máximo 100 rpm por 15 minutos. Colocar o restante da água e manter a agitação por mais 15 minutos.

O polímero **ART FLOC 3530** deve ser aplicado em soluções de até 0,75% através de bombas de deslocamento positivo conectada à linha de modo a obter no máximo 0,03% de concentração em relação ao volume em tratamento. Sugere-se agitação do produto antes de utilizar.

ARMAZENAMENTO/MANUSEIO:

O polímero **ART FLOC 3530** não é agressivo a metais nem apresenta qualquer risco significativo para manuseio, devendo ser observada as regras básicas de segurança para manuseio de produtos químicos. Sugere-se agitação constante do produto durante seu armazenamento.

EMBALAGEM:

Bombonas com 50 kg, tambores plásticos com 200 kg ou IBC com 1000 kg.

ASSISTÊNCIA TÉCNICA:

A **ARATROP** coloca sua equipe técnica à disposição para auxiliar no estudo da melhor solução técnico/econômica de sua necessidade.

A formulação deste produto segue todos os padrões científicos e técnicos da linha "ART". Contudo, nos isentamos em face de aplicação, utilização e manuseio inadequados do mesmo.

EMISSÃO 28/12/2022	ELABORADO POR: Ana Luiza Cubas	APROVADO POR Oscar K. Sato	REVISÃO 06	Página 1 de 1
-----------------------	-----------------------------------	-------------------------------	---------------	---------------

CERTIFICADO DE QUALIDADE

DADOS REFERENTES AO CLIENTE

Empresa Solicitante: UNAERP

DADOS REFERENTES AO PRODUTO

Nome do Produto: ART FLOC 1530

Data de Fabricação: 10/11/2023

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Análises Físico-Químicas	Especificações	Resultados
Densidade	0,9 – 1,1	1,07 g/cm ³
Cor	Branco/ Lev. amarelado	Branco
Carga	Aniônico	OK
Odor	Característico alifático	OK
Estabilidade	Estável	OK
Aparência	Emulsão leitosa	OK
Validade	200 dias	OK

RESPONSÁVEL DE CONTROLE DE QUALIDADE

Diretor Industrial	Oscar Kunio Sato	CRQ: 04116867 - IV Região
Engenheira Química	Liliane Maximiano de Almeida	CRQ: 04369249 - IV Região
Técnico de Laboratório	Givanildo Anselmo Rossatelli	CRQ: 04491857 - IV Região

Jardinópolis, 10 de novembro de 2023

Liliane M. de Almeida
RESPONSÁVEL TÉCNICO

 ARATROP NORDESTE ART – BT - 13	BOLETIM TÉCNICO DO PRODUTO ART FLOC 1530 (POLIELETRÓLITO)	Telefone de emergência (16) 3690-1100
--	--	--

O **ART FLOC 1530** é um polieletrólito em emulsão de alto peso molecular, alta eficiência que oferece grande versatilidade em utilização para tratamento de água, efluentes e os mais diversos processos industriais. O **ART FLOC 1530** proporciona a formação de flocos grandes e densos, o que permite uma decantação/flotação rápida e completa.

Os principais benefícios que a utilização do **ART FLOC 1530** apresenta são:

- Otimização dos equipamentos de processo;
- Melhora acentuada na turbidez do líquido tratado;
- Maior facilidade na remoção de cor orgânica;
- Redução no volume de produtos químicos manuseados;
- Maior facilidade na preparação e aplicação dos produtos químicos;
- Redução no custo do tratamento.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS:

- **ASPECTO:** Emulsão leitosa
- **DENSIDADE:** 1,00 ± 0,10 g/cm³
- **CARGA IÔNICA:** Aniônico

DOSAGEM:

A dosagem ideal do **ART FLOC 1530** será determinada após realização de teste específico. Recomendamos dosagem orientativa de 0,5 a 2,0 ppm para clarificação de 2,0 a 10,0 ppm para filtração de lodo.

APLICAÇÃO:

O **ART FLOC 1530** deve ser aplicado em solução aquosa utilizando água com temperatura entre 10 e 30° C. Preparo da solução: Adicionar metade do volume de água necessária ou até que o agitador fique submerso e em seguida, ligar a agitação e dosar o polímero lentamente, mantendo a agitação em no máximo 100 rpm durante 15 minutos. Colocar o restante da água e manter a agitação por mais 15 minutos.

O **ART FLOC 1530** deve ser aplicado em solução até 0,75 % através de bombas de deslocamento positivo conectada à linha, de modo não ultrapassar 0,03 % de concentração em relação ao volume em tratamento.

ARMAZENAMENTO/MANUSEIO:

O **ART FLOC 1530** não é agressivo, nem apresenta qualquer risco significativo para manuseio, devendo ser observada as regras básicas de segurança para manuseio de produtos químicos. Sugere-se agitação constante do produto durante seu armazenamento.

EMBALAGEM:

Bombonas com 50 kg, tambores plásticos com 200 kg ou IBC com 1000 kg.

ASSISTÊNCIA TÉCNICA:

A **ART NOR** coloca sua equipe técnica à disposição para auxiliar no estudo da melhor solução técnico/econômica de sua necessidade.

A formulação deste produto segue todos os padrões científicos da linha "ART". Contudo, nos isentamos em face de aplicação, utilização e manuseio inadequados do mesmo.

EMISSÃO 02/05/2023	ELABORADO POR: Ana Luiza Cubas	APROVADO POR Oscar K. Sato	REVISÃO 06	Página 1 de 1
-----------------------	-----------------------------------	-------------------------------	---------------	---------------

CERTIFICADO DE QUALIDADE

DADOS REFERENTES AO CLIENTE

Empresa Solicitante: UNAERP

DADOS REFERENTES AO PRODUTO

Nome do Produto: ART FLOC 2530

Data de Fabricação: 10/11/2023

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Análises Físico-Químicas	Especificações	Resultados
Densidade	1,00 ± 0,10	1,02 g/cm³
Cor	Branco	OK
Carga	Não Iônico	OK
Odor	Característico Alifático	OK
Aparência	Emulsão Branco Leitoso	OK
Estabilidade	Totalmente Estável	OK
Validade	200 dias	OK

RESPONSÁVEL DE CONTROLE DE QUALIDADE

Diretor Industrial	Oscar Kunio Sato	CRQ: 04116867 - IV Região
Engenheira Química	Liliane Maximiano de Almeida	CRQ: 04369249 - IV Região
Técnico de Laboratório	Givanildo Anselmo Rossatelli	CRQ: 04491857 - IV Região

Jardinópolis, 10 de novembro de 2023

Liliane M. de Almeida
RESPONSÁVEL TÉCNICO

 ARATROP NORDESTE ART – BT - 15	BOLETIM TÉCNICO DO PRODUTO ART FLOC 2530 (POLIELETRÓLITO)	Telefone de emergência (16) 3690-1100
--	--	--

O **ART FLOC 2530** é um polieletrólito em emulsão de alto peso molecular, alta eficiência, que oferece grande versatilidade em sua utilização para o tratamento de água, efluentes e os mais diversos processos industriais.

O **ART FLOC 2530** proporciona a formação de flocos grandes e densos, o que permite uma decantação/flotação rápida e completa.

Os principais benefícios que a utilização do polímero **ART FLOC 2530** apresenta são:

- Otimização dos equipamentos de processo.
- Melhora acentuada na turbidez do líquido tratado.
- Maior facilidade na remoção de cor orgânica.
- Redução no volume de produtos químicos manuseados.
- Maior facilidade na preparação e aplicação dos produtos químicos.
- Redução no custo do tratamento.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO/QUÍMICAS:

Aspecto: Emulsão branca leitosa

Densidade à 25°C: 1,00 ± 0,10 g/cm³

Carga iônica: Não-iônico

DOSAGEM:

A dosagem ideal do **ART FLOC 2530** será determinada após realização de testes específicos. Recomendamos como dosagem orientativa de 0,5 a 2,0 ppm para clarificação de 2,0 a 10,0 ppm para filtração do lodo.

APLICAÇÃO:

O **ART FLOC 2530** deve ser aplicado em solução aquosa utilizando água com temperatura entre 10 e 30°C. Adicionar metade do volume da água necessária ou até que o agitador fique submerso, ligar a agitação e dosar o polímero lentamente, mantendo a agitação em no máximo 100 rpm por 15 minutos. Colocar o restante da água e manter a agitação por mais 15 minutos.

O polímero **ART FLOC 2530** deve ser aplicado em soluções de até 0,75% através de bombas de deslocamento positivo conectada à linha de modo a obter no máximo 0,03% de concentração em relação ao volume em tratamento.

Sugere-se agitação do produto antes de utilizar.

ARMAZENAMENTO/MANUSEIO:

O polímero **ART FLOC 2530** não é agressivo a metais nem apresenta qualquer risco significativo para manuseio, devendo ser observada as regras básicas de segurança para manuseio de produtos químicos.

Sugere-se agitação constante do produto durante seu armazenamento.

EMBALAGEM:

Bombonas com 50 kg, tambores plásticos com 200 kg ou IBC com 1000 kg.

ASSISTÊNCIA TÉCNICA:

A **ARATROP** coloca sua equipe técnica à disposição para auxiliar no estudo da melhor solução técnico/econômica de sua necessidade.

A formulação deste produto segue todos os padrões científicos e técnicos da linha "ART". Contudo, nos isentamos em face de aplicação, utilização e manuseio inadequados do mesmo.

EMISSÃO 28/12/2022	ELABORADO POR: Fátima D'Acol	APROVADO POR Oscar K. Sato	REVISÃO 05	Página 1 de 1
-----------------------	---------------------------------	-------------------------------	---------------	---------------