



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS DE PALMAS  
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**GABRIEL ANTONIO RIBEIRO SOUZA**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO DESAGUAMENTO DE LODO  
DE ETA POR TUBO GEOTÊXTIL**

GABRIEL ANTONIO RIBEIRO SOUZA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO DESAGUAMENTO DE LODO  
DE ETA POR TUBO GEOTÊXTIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental da Fundação Universidade Federal do Tocantins como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Dr. Giulliano Guimarães Silva

Palmas/TO  
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

- S729a Souza, Gabriel Antonio Ribeiro.  
Análise da eficiência do desaguamento de logo de ETA por tubo geotêxtil.  
/ Gabriel Antonio Ribeiro Souza. – Palmas, TO, 2022.  
76 f.
- Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins  
– Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado)  
Profissional em Engenharia Ambiental, 2022.  
Orientador: Guillianio Guimarães Silva
1. desaguamento. 2. lodo. 3. tubo geotêxtil. 4. sólidos suspensos totais. I.  
Título

**CDD 628**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

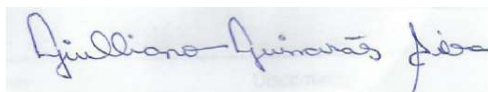
**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

GABRIEL ANTONIO RIBEIRO SOUZA

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO DESAGUAMENTO DE LODO DE ETA  
POR TUBO GEOTÊXTIL

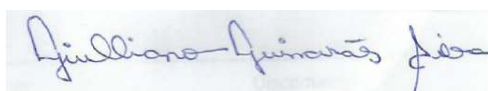
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

BANCA EXAMINADORA



---

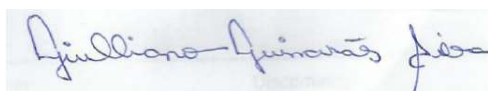
Dr. Giuliano Guimarães Silva (Presidente)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins



P/

---

Dr. Sérgio Carlos Bernardo Queiroz (Membro Titular Interno)  
Universidade Federal do Tocantins



P/

---

Dra. Cristina Filomena Pereira Rosa Paschoalato (Membro Titular Externo)  
Universidade de Ribeirão Preto

Aprovada em: 07 de outubro de 2022

O evento foi realizado por meio de vídeo conferência, conforme Art. 56 da Resolução nº 13, de 22 de março de 2017.

Dedico este trabalho ao meu pai, Elson Costa Souza, pelos ensinamentos passados ao longo de todos os anos em que estivemos juntos, principalmente aqueles sobre honestidade, resiliência e paciência. Os levarei comigo para sempre, muito obrigado, por tudo.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família pelo companheirismo ao longo de todos esses anos juntos.

Ao meu professor orientador Dr. Giulliano G. Silva por acreditar no meu potencial e me auxiliar ao longo de todo o curso de pós-graduação.

Ao professor Dr. Sérgio Carlos B. Queiroz pelo auxílio nos ensaios laboratoriais.

Ao IFTO por ceder o laboratório para a realização dos ensaios necessários.

E aos amigos e colegas de laboratório que me auxiliaram quando necessário na realização da pesquisa.

## RESUMO

Discussões a respeito da gestão do lodo de ETA têm sido pauta em diversas reuniões e trabalhos científicos nas recentes décadas. O constante aumento populacional, atrelado ao desenvolvimento tecnológico evidenciado nos últimos anos têm colaborado significativamente para o aumento da geração de lodo, especialmente aqueles produzidos em Estações de Tratamento de Água (ETA). A gestão do lodo é, portanto, uma problemática a nível ambiental, social e financeiro, e tem como uma das principais etapas as técnicas de desaguamento, procedimento responsável pela redução volumétrica, estabilização da fase sólida e reaproveitamento da fase líquida. Diante disso, a utilização de tubos geotêxteis como tecnologia de desaguamento vem sendo bastante difundida em ETAs, embora ainda existam poucos estudos que abordem a parametrização de projetos, e o tipo e a dosagem de condicionantes químicos ideais para cada ETA. Portanto, o presente trabalho buscou avaliar, a partir da execução de ensaios de bancada, o desempenho do processo de desaguamento de lodo de estação de tratamento de água por tubos geotêxteis, a partir da simulação de diversas concentrações de Sólidos Suspensos Totais (SST) e condicionantes químicos. Os resultados dos ensaios de bancada mostraram que a concentração de SST inicial do lodo e a dosagem do polímero não-iônico, exerceram influência na retenção do material sólido pelo tecido geotêxtil e o tempo de desaguamento. Os ensaios de desaguamento de lodo em bancada, tanto pressurizado, quanto a gravidade, obtiveram os melhores resultados de turbidez quando aplicadas dosagens de 1,5 mgPol/gSST com lodo em concentrações de SST variando de 2,5 g/L a 18,5 g/L. Em dosagens de polímero acima de 6 mgPol/gSST foi evidenciado alterações físicas do líquido filtrado e um aumento nos valores de turbidez do filtrado. Foi evidenciado ainda, uma retenção de 13% do teor de sólidos no interior do tubo geotêxtil para lodo com concentração de 2,5 g/L e 17,4% e 14,5% para lodos em concentrações de 10,5 g/L e 18,5 g/L, respectivamente. Os resultados obtidos a partir do planejamento experimental evidenciam a viabilidade técnica do desaguamento de lodo de ETA através de tubo geotêxtil, entretanto, devem ser realizados ensaios em escala real visando a confirmação dos resultados obtidos a partir dos ensaios de bancada.

**Palavras-chaves:** lodo, desaguamento, tubo geotêxtil, condicionantes químicos, SST.

## ABSTRACT

Discussion regarding the management of Water Treatment Plant (WTP) sludge have been guided in several meetings and scientific papers in recent decades. The constant population increase, tied to technological development evidenced in recent years, has contributed significantly to increase the sludge generation, especially those produced in WTP. Sludge management is, therefore, a problem at the environmental, social and financial level, and has as one of the main stages the dewatering techniques, procedure responsible for volume reduction, stabilization of the solid phase and reuse of the liquid phase. Therefore, the use of geotextile tubes as dewatering technology has been widespread in WTPs, although there are still few studies that address the parameterization of projects and the ideal type and dosage of chemical conditions for each WTP. Therefore, the present work aimed to evaluate, from the implementation of bench tests, the performance of the process of sludge dewatering of a water treatment plant by geotextile pipes, considering the simulation of several concentrations of Total Suspended Solids (TSS) and chemical conditioning agents. Bench tests outcome showed that the initial TSS concentration of sludge and the dosage of the non-ionic chemical conditioning influenced the retention of solid material by the geotextile fabric and the dewatering time. Bench sludge dewatering tests, both pressurized and by gravity obtained the best turbidity results when applied dosages of 1.5 mgPol/gTSS with a sludge at TSS concentrations ranging from 2.5 g/L to 18.5 g/L. In polymer concentrations above 6 mgPol/gTSS, physical changes of the filtered liquid were evidenced and an increase in filtered liquid turbidity values. It was also evidenced, retention of 13% of the solids content inside the geotextile tube for sludge with a concentration of 2.5 g/L and 17.4% and 14.5% for slats at concentrations of 10.5 g/L and 18.5 g/L, respectively. The results obtained from the experimental planning show the technical feasibility of dewatering WTP sludge through a geotextile tube. However, real-scale tests should be performed to confirm the results obtained on the bench tests, real-scale tests should be performed.

**Keywords:** sludge, dewatering, geotextile tube, chemical conditioning, TSS.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma de processos do tratamento da água bruta .....	18
Figura 2. Variação da concentração de SST durante o processo de lavagem dos filtros .....	21
Figura 3. Tecnologias mecanizadas de desaguamento de lodo de ETA.....	22
Figura 4. Tecnologias naturais de desaguamento de lodos .....	23
Figura 5. Classificação dos materiais geossintéticos.....	26
Figura 6. Estágios do desaguamento dos geotêxteis.....	28
Figura 7. Perda de partículas através da erosão interna.....	29
Figura 8. Formação do filter cake.....	30
Figura 9. Fluxograma de planejamento de pesquisa.....	34
Figura 10. Coleta e armazenamento do "lodo matriz": tanque de equalização (1), coleta e transporte do lodo em galões de 50 e 100 L (2), "lodo matriz" no laboratório de análise de águas (3) .....	37
Figura 11. Lodos de ETA com concentrações definidas pelo planejamento experimental.....	37
Figura 12. Fluxograma do planejamento experimental .....	38
Figura 13. Equipamentos para filtração em bancada: tecido geotêxtil, suporte universal, becker graduado, funil, redução de PVC 75x50 mm e abraçadeira metálica (1); equipamento de filtração montado (2). .....	40
Figura 14. Ensaio de bancada: agitação do lodo com adição de polímero (1), equipamento de filtração em bancada durante o desaguamento do lodo floculado (2). .....	41
Figura 15. Filtro pressurizado: peças necessárias para a montagem do filtro (1), filtro pressurizado montado (2) .....	42
 <b>ARTIGO 01</b>	
Figura 16. Fluxograma de procedimentos .....	47
Figura 17. Lodo matriz coletado e armazenado em barris. ....	48
Figura 18. Coleta do Lodo Matriz e armazenamento (1), preparo das concentrações de lodo definidas .....	49
Figura 19. Equipamentos para filtração em bancada: tecido geotêxtil, suporte universal, becker graduado, funil, redução de PVC 75x50 mm e abraçadeira metálica (1); equipamento de filtração montado (2). .....	50
Figura 20. Ensaio de bancada: agitação do lodo com adição de polímero (1), equipamento de filtração em bancada durante desaguamento do lodo floculado (2). .....	51

Figura 21. Curva de contorno da Turbidez do Filtrado: (a) Polímero Catiônico 9080-X, (b) Polímero Catiônico 9040-X, (c) Polímero Catiônico 9020-X, (d) Polímero Não-Iônico 3001-X. .....	56
Figura 22. Curva de contorno do Tempo de Desaguamento: (a) Polímero Catiônico 9080-X, (b) Polímero Catiônico 9040-X, (c) Polímero Catiônico 9020-X, (d) Polímero Não-Iônico 3001-X. .....	57

## **ARTIGO 02**

Figura 23. Fluxograma de procedimentos .....	61
Figura 24. Lodo matriz coletado e armazenado em barris. ....	62
Figura 25. Coleta do Lodo Matriz e armazenamento (1), preparo das concentrações de lodo definidas .....	63
Figura 26. Equipamentos para filtração pressurizada em bancada: peças necessárias para a montagem do filtro (1); filtro pressurizado montado (2).....	64
Figura 27. Ensaio com filtro pressurizado em geotêxtil: coleta do material filtrado durante o ensaio (1); Ajuste de pressão para 1,45 Kpi (2); Material sólido retido na membrana geotêxtil (3). ....	65
Figura 28. Ensaio de determinação do teor de sólidos e umidade: amostras úmidas dentro da estufa (1), amostras secas após secagem na estufa (2). ....	65
Figura 29. Curva de contorno da Turbidez do filtrado (A), Tempo de desaguamento (B), Vazão (C), Teor de sólidos do resíduo desaguado (D) e Umidade (E). ....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Vantagens e desvantagens dos processos mecanizados de desaguamento.....	<b>Erro!</b>
<b>Indicador não definido.</b>	
Tabela 2. Vantagens e desvantagens dos processos naturais de desaguamento.....	24
Tabela 3. Funções dos diferentes tipos de geossintéticos.....	26
Tabela 4. Relação entre propriedades e funções dos geossintéticos.....	27
Tabela 5. Mecanismo de funcionamento dos principais condicionantes químicos.....	31
Tabela 6. Relação dos equipamentos necessários .....	35
Tabela 7. Condicionantes químicos e coagulantes .....	35
Tabela 8. Parâmetros e unidades de medida.....	36
Tabela 9. Condições experimentais das variáveis independentes .....	38
Tabela 10. Condicionantes químicos utilizados .....	39
Tabela 11. Delineamento de Face Centrada para os ensaios de bancada em tecido geotêxtil .	40
Tabela 12. Propriedades físicas dos geotêxtil ensaiado.....	40
<b>ARTIGO 01</b>	
Tabela 13: Parâmetros, métodos e limites de medição.....	47
Tabela 14: Produtos químicos utilizados como condicionantes químicos .....	47
Tabela 15: Propriedades físicas dos geotêxteis ensaiados.....	48
Tabela 16: Resultados da Caracterização físico-química dos lodos de estudo.....	51
Tabela 17. Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9080-X. ....	52
Tabela 18. Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9040-X. ....	52
Tabela 19. Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9020-X. ....	53
Tabela 20. Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero não-iônico 3001-X.....	53
Tabela 21. Resumo das variáveis independentes, concentração de SST e dosagem do polímero, em valores codificados e reais (entre parêntese) e as respostas das variáveis dependentes turbidez e tempo para cada polímero.....	55
Tabela 22: Porcentagem de variância explicada ( $R^2$ ), valor F calculado ( $F_{calc.}$ ) e F tabulado ( $F_{tab.}$ ) para as respostas de turbidez do filtrado e tempo de desaguamento, por análise de	

variância (ANOVA) .....	55
-------------------------	----

## **ARTIGO 02**

Tabela 23. Parâmetros, métodos e limites de medição.....	61
Tabela 24. Propriedades físicas do geotêxtil utilizado. ....	62
Tabela 25. Delineamento de Face Centrada para o ensaio de bancada pressurizado .....	63
Tabela 26: Resultados da Caracterização físico-química dos resíduos de estudo .....	66
Tabela 27. Coeficiente de regressão e desvio padrão das variáveis Turbidez e Tempo de desaguamento. ....	66
Tabela 28. Coeficiente de regressão e desvio padrão das variáveis Vazão e Teor de sólidos. ....	67
Tabela 29. Coeficiente de regressão e desvio padrão da variável Umidade.....	67
Tabela 30. Resumo das variáveis independentes, concentração de SST e dosagem do polímero, em valores codificados e reais (entre parêntese) e as respostas das variáveis dependentes.....	68
Tabela 31. Porcentagem de variância explicada ( $R^2$ ), valor F calculado ( $F_{calc}$ ) e F tabulado ( $F_{tab}$ ) para as respostas das variáveis dependentes. ....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FPPC	Filtro Prensa de Placas tipo Câmara
FPPM	Filtro Prensa de Placas tipo Membrana
GDT	<i>Geotextile Tube Dewatering Test</i>
GTX-K	<i>Geotextile Knitted</i>
GTX-NW	<i>Geotextile Non-Woven</i>
GTX-W	<i>Geotextile Woven</i>
HBT	<i>Hanging Bag Test</i>
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
OPEX	<i>Operation Expenditure</i>
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SES	Sistema de Esgoto Sanitário
SRSU	Sistema de Resíduos Sólidos Urbanos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SDU	Sistema de Drenagem Urbana

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	15
2.	OBJETIVO .....	17
2.1.	Objetivo geral .....	17
2.2.	Objetivos específicos .....	17
3.	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
3.1.	Sistema de abastecimento de água.....	18
3.2.	Origem dos lodos gerados no processo de tratamento de água .....	19
3.3.	Tecnologias de tratamento dos lodos da ETA .....	20
3.3.1.	Equalização dos lodos.....	21
3.3.2.	Desaguamento de lodo de ETA .....	21
3.4.	Geossintéticos .....	25
3.4.1.	Propriedades dos materiais geossintéticos.....	26
3.5.	Mecanismo de filtração em geotêxteis .....	28
3.6.	Estudos sobre a eficiência de desaguamento por tubos geotêxteis.....	31
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1.	Artigo 01: Avaliação do desaguamento do lodo de ETA obtido através da filtração por gravidade em tecido geotêxtil com aplicação da metodologia de superfície de resposta. 44	
5.2.	Artigo 02: Avaliação do desaguamento do lodo de ETA obtido através da filtração pressurizada em tecido geotêxtil com aplicação da metodologia de superfície de resposta. 58	
6.	CONCLUSÕES .....	70
7.	REFERÊNCIAS .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

A vasta produção de lodo de ETA e seus consequentes efeitos negativos a respeito da disposição no meio ambiente tem entrado em discussão. Os impactos ambientais acarretados por meio do lodo proveniente de estações de tratamento de água são função das características da água bruta coletada, da quantidade de produtos químicos utilizados durante o processo de tratamento da água e a forma de limpeza dos decantadores (NIELSEN, 2015; ANDREOLI, 2001; ANDRADE *et al*, 2014).

A problemática relacionada ao lodo proveniente da ETA têm sido amplamente discutidos ao longo dos anos, pois a sua disposição tanto no solo, quanto em corpos d'água podem acarretar impactos ambientais severos.

Sua grande preocupação se pauta na disposição *in natura*, que tende a acarretar impactos ambientais severos à mananciais e solos férteis. No Brasil, os mananciais são os principais pontos de lançamento do lodo de ETA. Estudos conduzidos por Cornwell *et al* (2000) e Simpson *et al* (2002) revelaram que em países como EUA e Inglaterra, o descarte de lodo de ETA e ETE em mananciais representam valores abaixo de 15%, indicando menores volumes de lodo em mananciais e a consequente redução do risco de assoreamentos, desequilíbrio biótico e a presença de patogênicos e metais pesados em rios e lagos.

Advindos de dois processos distintos em um sistema convencional de tratamento de água, ou também conhecido como tratamento por ciclo completo, o lodo é produzido nos decantadores e na água de lavagem dos filtros e possuem diferentes características, tais como valores de turbidez, SST e coagulantes, aumentando assim o grau de dificuldade no gerenciamento desse lodo (FONTANA, 2004).

Por se tratar de um lodo de difícil manuseio e deslocamento, as tecnologias de desaguamento vêm sendo amplamente aplicadas com a finalidade de reduzir o volume da fase líquida, diminuindo problemas operacionais e logísticos existentes. Tais sistemas consistem na separação da fase sólido-líquida a partir do processo de desaguamento, acarretando o aumento do teor de sólidos suspensos totais (SST) que ficam retidos no interior desses sistemas. Dentre as tecnologias aplicáveis aos processos de desaguamento, destacam-se os processos mecanizados de filtros prensa e centrífugas, já para os processos naturais, leitos de secagem e tubos em geotêxtil (SILVA *et al*, 2020; DI BERNARDO *et al*, 2012).

Como alternativa aos métodos de disposição convencional de lodos, a filtração por tubos geotêxteis têm sido cada vez mais utilizada devido a facilidade operacional e ao baixo consumo de energia elétrica, gasto este que representa mais da metade do *Operational Expenditure* (OPEX) mensal de uma ETA (MUTHUKUMARAN, 2006).

O uso de bolsas e tubos geotêxteis têm aumentado significativamente devido as suas

vantagens do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. Produzidos a partir de uma malha polimérica flexível com pequenos furos, as bolsas e tubos geotêxteis realizam o processo de drenagem da fase líquida e confinamento da fase sólida, proporcionando a redução do volume original e facilitando os processos subsequentes (SILVA et al, 2020; BARROSO, 2007; QUEIROZ, 2019).

A eficiência da separação da fase sólido-líquida pelos tubos e bolsas geotêxteis dependem de fatores como, a qualidade do manancial da qual é retirada a água para consumo, das especificações técnicas do material geotêxtil e da dosagem de condicionantes químicos. Driscoll J. *et al* (2016) relatam sobre a importância dos testes de bolsa pendurados ou *Hanging Bag Test* (HBT) e do teste de desaguamento por tubo geotêxtil ou *Geotextile Tube Dewatering Test* (GDT) na determinação da taxa de filtração, da perda de sólidos e da torta filtrada, testes comumente realizados para a predição da performance de desaguamento dos tubos e bolsas geotêxteis. Além disso, no teste GDT ainda é possível confirmar a dosagem de polímero ideal para a escala real de aplicação.

Embora existam pesquisas a respeito do processo de desaguamento pela utilização de tubos e bolsas de geotêxtil em sistemas de tratamento de lodo de ETA, ainda são poucos os trabalhos que abordam estudos que relacionam as concentrações ideais de sólidos suspensos totais (SST) para que haja uma eficiência mínima desses materiais na retenção da fase sólida e a consequente formação da torta filtrada com um menor volume de líquido.

Dentro deste contexto, a contribuição científica da pesquisa foi verificar parâmetros de teor de sólidos suspensos totais, dosagem de polímero e o teor de sólidos retidos em diferentes concentrações de lodo advindos das duas principais etapas de geração de lodo em uma estação de tratamento de água, sendo elas as etapas de decantação e lavagem dos filtros. A requerida parametrização fez-se necessária para a validação da importância de tais variáveis para um processo de desaguamento eficiente, de modo a evitar processos mecanizados com altos custos energéticos.



## 2. OBJETIVO

### 2.1. Objetivo geral

A presente pesquisa tem por objetivo geral avaliar o processo de desaguamento de lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA) através de ensaios de semi-desempenho em bancada, levando em consideração o polímero e a concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST).

### 2.2. Objetivos específicos

- 2.2.1. Reproduzir um sistema de bancada de desaguamento em tubo geotêxtil através da aceleração da gravidade e pressurizado;
- 2.2.2. Avaliar a influência da dosagem dos condicionantes químicos, polímeros catiônicos e não-iônicos na eficiência do processo de desaguamento;
- 2.2.3. Estimar, através de ferramenta estatística decorrente do planejamento experimental, a influência da concentração de SST do lodo, a dosagem do polímero no desaguamento;
- 2.2.4. Analisar, a partir dos resultados obtidos por meio da ferramenta estatística DOE (*design of experiments*) o polímero que melhor se ajustou ao modelo estatístico.
- 2.2.5. Avaliar a eficiência do polímero com maior ajuste ao modelo estatístico no ensaio de filtro pressurizado em geotêxtil.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. Sistema de abastecimento de água

Pautada através da Lei nº 11.445 de 05 de janeiro de 2007, o setor do saneamento básico é dividido em quatro principais sistemas, o Sistema de Abastecimento de Água (SAA), Sistema de Esgoto Sanitário (SES), Sistema de Resíduos Sólidos Urbanos (SRSU) e o Sistema de Drenagem Urbana (SDU) (ACHON, 2008).

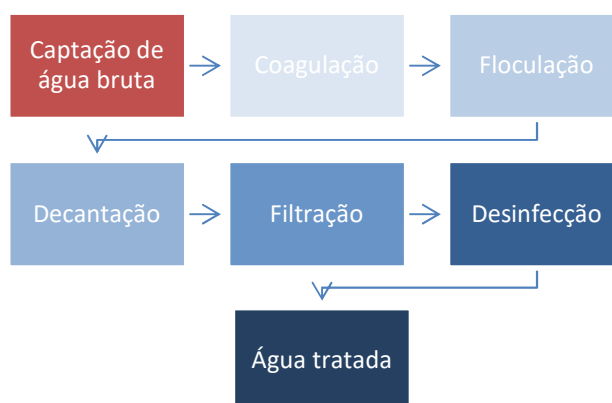
No que tange o Sistema de Abastecimento de Água (SAA), foco da pesquisa em questão, constituem-se de parte desse sistema a captação e adução de água bruta, o tratamento a partir de uma Estação de Tratamento de Água (ETA), reservação e distribuição ao consumidor final.

Projetadas para a produção de água que atenda ao padrão de potabilidade, as Estações de Tratamento de Água (ETA) são definidas como um conjunto de instalações e equipamentos, tendo em vista processos e operações com introdução de produtos químicos necessários a obtenção da potabilidade dessa água (FERNANDES, 2014).

Considerado um bem essencial à sobrevivência humana, a água acompanha a evolução histórica da humanidade e com ela, surgem novos desafios na busca da melhoria da qualidade de vida. A partir disso, as ETAs surgiram como um mecanismo de remoção de patogênicos e outros elementos físico-químicos encontrados nas águas brutas de rios e lagos. Através da utilização de processo sucessivos combinados de remoção impurezas nas águas, surgiram os processos de tratamento de água, em especial, o tratamento convencional ou também conhecido como tecnologia de ciclo completo, método este mais adotado no Brasil (FERNANDES, 2014; TUNDISI, 2013).

Dentro das ETAs de ciclo completo, a água bruta percorre uma série de processos até se enquadrar nos padrões de potabilidade, como a coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção de pH, conforme pode ser visualizado na Figura 1 abaixo.

Figura 1. Fluxograma de processos do tratamento da água bruta



Fonte: adaptado de Moreira (2017).

O processo de coagulação dentro de um sistema de tratamento de água convencional, ou de ciclo completo consiste basicamente na desestabilização das partículas coloidais através da reação química do coagulante com a água, seguida de uma mistura rápida. Após o processo de coagulação, dá-se início ao processo de floculação, processo este conhecido por aumentar o tamanho das partículas coloidais a partir das colisões promovidas entre si por meio de um processo físico. A terceira etapa do processo de tratamento de água consiste na decantação das partículas coloidais floculadas por meio da decantação gravitacional, promovendo a clarificação da fase líquida (FERNANDES, 2014).

Ainda segundo Fernandes (2014), o processo seguinte à decantação é denominado filtração. A filtração é conhecida pela separação da fase sólida da líquida, englobando fenômenos de ordem física, química e até biológica. Geralmente compostos de uma camada de areia e antracito, os filtros retêm as impurezas arrastadas pela água decantada, formando assim o lodo de ETA. Posteriormente, esse lodo é lavado e encaminhado ao tanque de equalização.

Por fim, as ETAs ainda apresentam os processos de desinfecção e fluoretação. O processo de desinfecção visa a remoção de microrganismos patogênicos presentes na água a partir da aplicação de oxidantes e desinfetantes como o cloro. Entretanto, segundo Di Bernardo (2014), os processos de desinfecção a partir da pré-oxidação e adsorção tendem a influenciar diretamente no volume mássico do lodo gerado. A fluoretação é uma etapa necessária que visa promover a saúde bucal da população, utilizando-se do ácido fluossilícico e fluossilicato de sódio.

### **3.2. Disposição inadequada dos lodos gerados no processo de tratamento de água**

O grande aumento na produção de lodo oriundos de ETAs tem se tornado uma problemática tanto a nível nacional quanto a nível mundial. As crescentes industrializações ao longo dos anos trouxeram consigo o aumento na busca por água potável, o que levou um aumento significativo no número de ETAs e conseqüentemente, o aumento de impactos ambientais em rios e solos, destinos comumente utilizados para o descarte de lodo sem tratamento. Como resultados da disposição desses lodos, solos e corpos aquáticos tendem a se tornarem impróprios para quaisquer outras atividades (MUTHUKUMARAN E ILAMPARUTHI, 2006).

Em um sistema convencional de tratamento de água, o lodo é gerado em quatro principais etapas, sendo eles oriundos da limpeza dos decantadores, da lavagem dos filtros, dos floculadores e de tanques de preparação de produtos químicos. Os processos de produção de lodo considerados representativos, em termos de massa e volume, são os lodos provenientes das águas de lavagem dos filtros e dos separadores de fase sólido-líquido (SCALIZE, 2003; DI BERNARDO E SABOGAL, 2008). Segundo Richter (2001), em linhas gerais, a massa total de

lodo em base seca gerada por um sistema de tratamento de água convencional é representada por cerca de 60 a 95% oriunda de tanques de decantação, sendo o restante desse lodo advindo da água de lavagem dos filtros.

Entretanto, segundo Di Bernardo *et al.* (2017), fatores quantitativos e qualitativos podem influenciar diretamente no volume mássico de lodo gerado por estes dois principais mecanismos de produção de lodos. Dentre eles, destacam-se a qualidade da água bruta, a tecnologia de tratamento adotada, dosagem de coagulantes químicos, utilização de processos de pré-oxidação, automação de processos e até expertise por parte dos operadores.

### **3.3. Tecnologias de tratamento dos lodos da ETA**

Inúmeras tecnologias para tratamento de lodo oriundos de ETA têm surgido ao longo dos anos. Tais tecnologias levam em consideração fatores climáticos, área disponível, concentração e volume dos lodos gerados, a mão-de-obra disponível no local, consumo energético disponível, entre outros. Para isso, se faz necessário o conhecimento das características do lodo gerado visando a escolha da tecnologia mais adequada para cada caso. A caracterização do lodo de ETA deve levar em consideração parâmetros como: sólidos (totais, suspensos e dissolvidos), turbidez, pH, carbono orgânico total (COT), etc. (GUIMARÃES, 2007).

Conforme explicitado por Di Bernardo *et al.* (2012), anterior a escolha do método de tratamento dos lodos, é necessário a realização de um diagnóstico de funcionamento da ETA em questão a fim de se levantarem características operacionais necessárias a um adequado dimensionamento do sistema de tratamento de lodos.

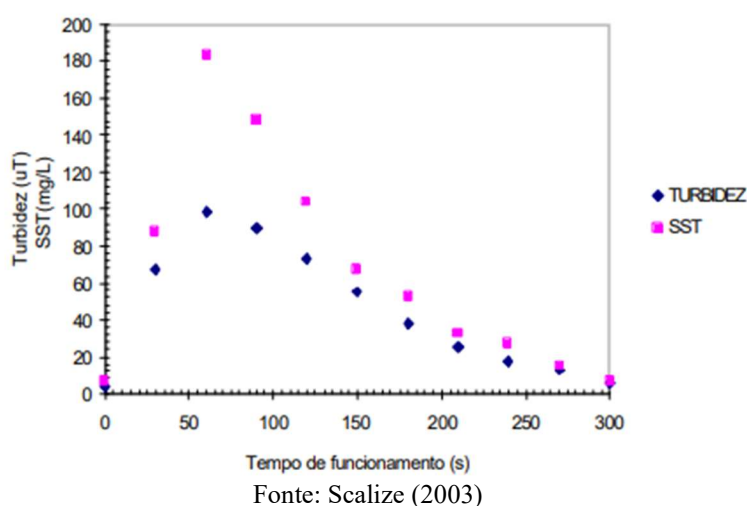
Com relação aos filtros, devem ser levados em consideração o tipo de meio filtrante, taxa de filtração, método de controle, tipo de lavagem, frequência de lavagem, duração da lavagem, vazão utilizada, expansão promovida no meio filtrante, volume de água usado em cada lavagem, coleta de amostras da água de lavagem de pelo menos dois filtros durante o tempo de lavagem, preparação de uma amostra composta e medição de suas características (SST, DQO, DBO<sub>5</sub> etc.).

Para os decantadores, devem ser levados em consideração as características do tipo e número de decantadores, taxa de escoamento superficial, características da água floculada e decantada, eficiência de remoção de flocos, vazão afluente a cada decantador, descarga hidráulica ou mecanizada, frequência de descarga, frequência de limpeza manual em decantadores sem removedor de lodo, coleta de amostras durante a limpeza relacionadas com a vazão de descarga, preparação de uma amostra composta e medição de suas características (SST, DQO, DBO<sub>5</sub> etc.).

### 3.3.1. Equalização dos lodos

O processo de equalização dos lodos visa a obtenção de lodo homogêneo, haja vista que as concentrações de SST dos processos de lavagem dos filtros e descarga de decantadores em ETAs possuem valores diferentes, impactando diretamente no custo final do produto desaguado. Este fato pode ser observado, por exemplo, no processo de lavagem dos filtros, onde, com o passar do tempo, as concentrações dos parâmetros de turbidez e SST tendem a diminuir, alterando as concentrações de sólidos à medida que o material recircular para o início da ETA ou para os sistemas de tratamento de lodo propriamente ditos (SCALIZE, 2003), conforme pode ser visualizado na Figura 2 abaixo.

Figura 2. Variação da concentração de SST durante o processo de lavagem dos filtros



### 3.3.2. Desaguamento de lodo de ETA

Em função do elevado volume da fase líquida em relação a fase sólida dos lodos de ETA, surgem os métodos e técnicas de desaguamento de lodo. Sendo assim, desaguamento ou desidratação é o nome dado para o processo de separação da fase sólido-líquida ou ainda, segundo Di Bernardo *et al.* (2012), é o nome dado para o processo de aumento no teor de SST e de redução volumétrica do lodo a ser disposto, podendo ser realizado através de sistemas mecanizados ou naturais. As Figuras 3 e 4 trazem, respectivamente, alguns exemplos de sistemas mecanizados e sistemas naturais de desaguamento de lodo oriundos de ETA.

Figura 3. Tecnologias mecanizadas de desaguamento de lodo de ETA



Fonte: autor (2021)

Processos mecânicos de desaguamento geralmente são mais recomendados para estações de tratamento com pouca disponibilidade de área e que desejam obter alto grau de compactação da massa de lodo sólido. Dentre os equipamentos disponíveis no mercado, destacam-se as prensas desaguadoras, centrífugas, filtros prensa e filtros rotativos (RICHTER, 2001; SCALIZE, 2003). O Tabela 1 traz a relação de vantagens e desvantagens dos processos mecanizados de desaguamento de lodo de ETA.

Tabela 1. Vantagens e desvantagens dos processos mecanizados de desaguamento

Desaguamento mecanizado	
Vantagens	Desvantagens
1) Diminuição de custos de transporte	1) Requer energia elétrica para funcionamento
2) Potencializa a utilização do resíduo como cobertura para aterros	2) Possibilidade de geração de gases tóxicos
3) Independe de fatores climáticos da região	3) Alto custo energético e grande investimento inicial
4) Requer menores áreas para funcionamento	4) Necessidade de desaguamento do resíduo antes da utilização

Fonte: adaptado de Di Bernardo e Dantas (2005)

Segundo Di Bernardo *et al.* (2012, 2017), no que tangem as tecnologias de desaguamento mecanizadas, são destacadas as seguintes:

- Centrífugas: consiste em um equipamento provido de tanque para armazenamento e misturador submersível ou agitador tipo turbina. À medida que o lodo adentra a câmara da centrífuga, por meio de bombas, o lodo recebe uma

solução de polímero que visa auxiliar no processo de formação de partículas coloidais de maiores dimensões, facilitando o processo de desaguamento;

- Filtro prensa de esteira: nesta tecnologia de desaguamento, o lodo a ser desaguado adentra uma câmara, onde é adicionada uma solução de polímero, e então, com uma esteira porosa, é realizada a separação da fase sólido-líquida do lodo. Por fim, a fase sólida passa por uma série de rolos de tração até a formação do produto desidratado;
- Filtro prensa de placas: existem dois tipos de filtros prensa de placas, o filtro prensa de placas tipo membrana (FPPM) e o filtro prensa de placas tipo câmara (FPPC). Nesta tecnologia de desaguamento, há o bombeamento do lodo, a aplicação de polímero, e então, por meio do fluido hidráulico, ocorre a pressurização das membranas sobre o lodo, obtendo-se a saída da fase líquida e a formação da torta desaguada;
- Prensa desaguadora tipo parafuso: nesse tipo de tecnologia, o lodo é concentrado em um tanque de homogeneização e aplica-se uma solução polimérica para auxiliar na floculação das partículas sólidas. Após isso, o lodo adentra o equipamento com formato de parafuso, e lá dentro ocorrem os processos de concentração, filtração e prensagem. Após esse processo, a torta de lodo formada é separada e levada a um destino apropriado.

Figura 4. Tecnologias naturais de desaguamento de lodos



Fonte: autor (2021)

Nos processos de desaguamento naturais, há a remoção da fase líquida através da evaporação natural e percolação por gravidade ou induzida. Esses métodos requerem grandes áreas para as suas instalações (SCALIZE, 2003). O Tabela 2 traz a relação de vantagens e

desvantagens dos processos naturais de desaguamento de lodo de ETA.

Tabela 2. Vantagens e desvantagens dos processos naturais de desaguamento

Desaguamento natural	
Vantagens	Desvantagens
1) Diminuição de custos de transporte até o destino	1) Exige grandes áreas de implantação
2) Baixo custo energético	2) O projeto necessita do conhecimento das condições climáticas da região
3) Potencializa o emprego do resíduo como cobertura para aterros	3) Necessidade de maquinário para o revolvimento do resíduo periodicamente
4) Simplicidade operacional	4) Necessidade de desaguamento do resíduo antes da utilização

Fonte: adaptado de Di Bernardo e Dantas (2005)

Conforme apresentado por Di Bernardo *et al.* (2012, 2017), com relação às tecnologias de desaguamento naturais, destacam-se as seguintes:

- Lagoas: essa tecnologia de baixo custo é muito indicada para ETAs de pequeno porte. Neste tipo de tecnologia são feitas lagoas de baixa profundidade (lâmina líquida máxima de 2,00 m) e grandes comprimentos. Os taludes devem ser revestidos de modo a evitar erosão e contaminação do solo. A partir do contato direto do lodo com a luz solar, a água evapora e foram-se as tortas de lodo;
- Filtração em leito de secagem e leito de drenagem: o desaguamento ocorre através da evaporação e da drenagem por meio poroso. No leito de secagem há duas principais camadas, uma de pedregulho, com função de suporte para a camada mais acima e função de percolação do líquido drenado, e uma camada de areia grossa com função de percolação da fase líquida.
- Filtração em geotêxtil: nessa tecnologia, a fase líquida é separada da fase sólida através da drenagem do líquido pelos poros do geotecido, ocorrendo o desaguamento progressivo do lodo e a sua conseqüente redução volumétrica.



### 3.4. Geossintéticos

Oficializado por Jean Pierre Giroud na *International Conference of the Use of Fabrics in Geotechnics*, os geossintéticos são caracterizados por serem produtos utilizados em diversas aplicações geotécnicas, podendo desempenhar variadas funções (primárias ou secundárias) em uma obra de geotecnia. Compostos de fibras ou filamentos têxteis ordenados ou dispostos aleatoriamente, esse material pode ser utilizado como material de reforço, material filtrante, drenagem, proteção, barreira de fluxo e controle de erosão superficial (URASHIMA, 2002; ISO 10.318-1, 2018).

Urashima (2002) e Shukla e Yin (2006), descrevem os principais pontos do desenvolvimento dos geossintéticos ao longo dos anos:

As primeiras aplicações de materiais geossintéticos ocorreram em 1926, através do departamento de estrada da Carolina do Sul (*South Carolina Highway Department*), onde objetivaram reforçar estradas e rodovias. No final dos anos de 1950 foram produzidas mantas sintéticas visando a proteção de obras na costa da Holanda, devido a problemas causados por desastres naturais.

Ainda nos anos 50, nos EUA, foram utilizadas mantas geossintéticas como material para filtros granulares. Já nos anos de 1960, tiveram os primeiros registros da utilização do material polimérico como reforço para aterros sobre solos moles e estradas de acesso na França. Entretanto, somente a partir da década de 1970 ocorreu a aceleração e padronização do uso de geossintéticos em obras geotécnicas, com a aplicação do material polimérico em barragens e muros de contenção.

Por fim, a partir da década de 1990, foram publicadas normas relacionadas a geossintéticos por organizações como: *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e *International Organization for Standardization* (ISO).

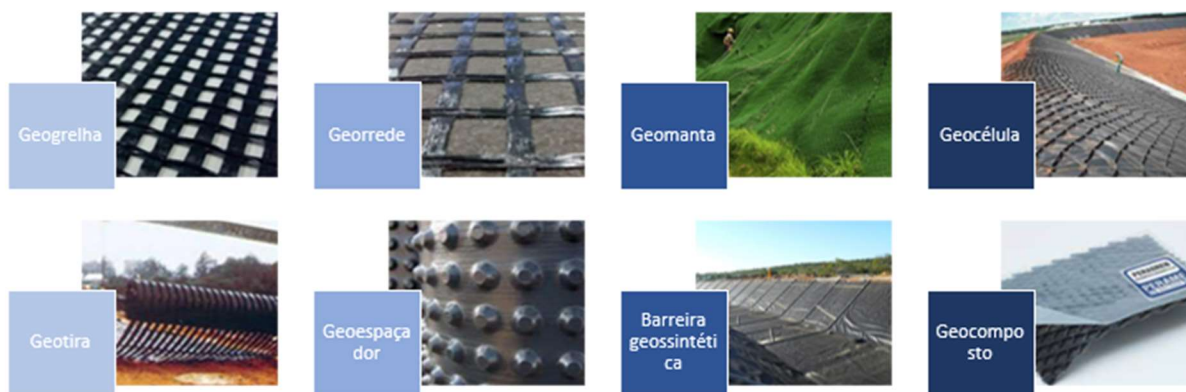
Segundo a ABNT NBR ISO 10.318 Geossintéticos – Parte 1: Termos e definições (2018), os materiais getêxteis podem ser divididos em três principais grupos, os geotêxteis tecidos (GTX-W), os não-tecidos (GTX-NW) e os geotêxteis tricotados (GTX-K).

- Geotêxtil tecido (GTX-W): produzidos pelo entrelaçamento, geralmente em ângulos retos, com dois ou mais conjuntos de fios;
- Geotêxtil não-tecido (GTX-NW): produzidos por fibras, filamentos, ou outros elementos, orientadas de maneira direcional ou aleatória;
- Geotêxtil tricotados (GTX-K): produzidos entrelaçando um ou mais fios, filamentos, ou outros elementos.

Os geossintéticos são classificados, segundo a ISO 10.318 (2018) em: geogrelhas,

georrede, geomanta, geocélula, geotira, geoespaçador, barreira geossintética (polimérica, argilosa ou betuminosa) e geocomposto. Suas imagens podem ser visualizadas na Figura 5 abaixo. Já na Tabela 3 abaixo, é possível visualizar a aplicabilidade de cada tipo de geossintético.

Figura 5. Classificação dos materiais geossintéticos



Fonte: adaptado ISSO 10.318 (2018)

Tabela 3. Funções dos diferentes tipos de geossintéticos

Geossintéticos	Funções						
	Drenagem	Filtragem	Proteção	Reforço	Separação	Controle de erosão	Barreira de fluidos
Geogrelha				X			
Georrede	X						
Geomanta						X	X
Geocélula				X		X	
Geotira				X			
Geoespaçador	X						
Barreira geossintética			X		X		X
Geocomposto	X			X			X

Fonte: adaptado de Vertematti (2015)

#### 3.4.1. Propriedades dos materiais geossintéticos

Os materiais geossintéticos apresentam propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas que se diferem de acordo com as funções a serem desempenhadas. Deste modo, o conhecimento e análise das suas propriedades se fazem necessárias para a correta análise e aplicação baseadas nas condições de solicitação (URASHIMA, 2002).

Silva (2017) relata que as propriedades físicas dos geossintéticos são caracterizadas pela gramatura, espessura, porosidade, forma, abertura de filtração, do arranjo estrutural dos fios e da distribuição dos poros.

Conforme descrito por Munoz (2005), as características apresentadas pelos materiais geossintéticos quanto as suas propriedades mecânicas são: compressibilidade, resistência à

tração não confinada, a resistência à penetração por punção e a resistência à perfuração dinâmica. Silva (2017) relata sobre as condições críticas dos tubos geossintéticos quando submetidos à fase de enchimento, onde segundo o autor, as tensões axiais e de tensão tendem a atingir o estado limite de serviço suportado pelo material polimérico.

Condutividade hidráulica, abertura de filtração, transmissividade e permissividade são as características referentes às propriedades hidráulicas dos materiais geotêxteis. Para Silva (2017), os sistemas de filtros com geotêxteis são dimensionados em função dos critérios de retenção da fração sólida e permeabilidade da fração líquida. Nos tubos geotêxteis o escoamento do fluido ocorre através de tecidos, onde a parte líquida é expelida para o exterior e a fração sólida fica retida no interior dos tubos.

A Tabela 4 abaixo traz a relação entre as propriedades dos materiais geossintéticos com as suas respectivas funções. Onde: **1** Propriedade com baixa significância, **2** Propriedade com média significância e **3** Propriedade com alta significância.

Tabela 4. Relação entre propriedades e funções dos geossintéticos

Propriedades	Funções					Barreira de fluidos
	Drenagem	Filtragem	Separação	Reforço	Proteção	
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	3
Atrito	-	-	-	3	1	-
Transmissividade	3	1	-	-	-	-
Distribuição de poros	2	3	2	-	-	-
Permissividade	2	3	2	-	-	-

Fonte: adaptado de Lopes (1998)

Entretanto, vale ressaltar que tais propriedades dos materiais geotêxteis não levam em consideração fatores externos como condições de campo, podendo interferir diretamente tanto no processo de execução da obra, quanto na sua vida útil (MUNOZ, 2005).

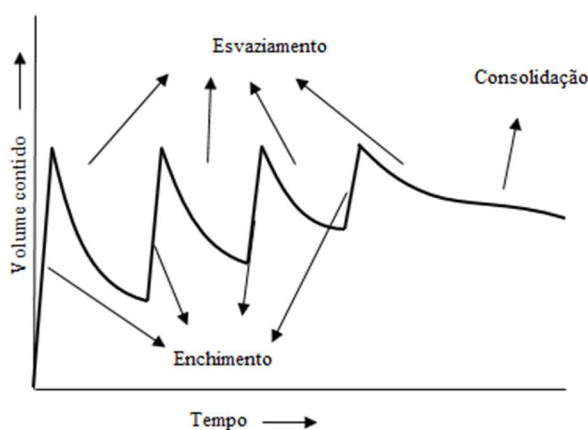
### 3.5. Mecanismo de filtração em geotêxteis

A larga utilização de filtros geotêxteis como substituto de materiais naturais em sistemas de drenagem têm apresentado grande aceitação no mercado devido à sua viabilidade do ponto de vista técnico, ambiental e econômico, quando comparados aos sistemas naturais. Para isso, a aplicação dos geotêxteis tecidos ou não-tecidos em sistemas de filtração devem garantir o não impedimento do fluxo de água através da membrana polimérica, à medida que retêm as partículas sólidas (MUNOZ, 2005; SILVA, 2018).

A utilização de sistemas confinados para desaguamento dos lodos oriundos de estações de tratamento de água teve suas primeiras aplicações no início da década de 1990. Silva (2018) relata que o processo de desaguamento envolve o bombeamento de um elevado volume de água contendo partículas sólidas para áreas confinadas com o objetivo de reduzir o volume de água no lodo.

O desaguamento com tubos e bolsas em geotêxtil englobam três estágios principais. O primeiro deles é chamado de estágio de enchimento, onde, com o auxílio de uma bomba, o lodo é bombeado para dentro do tubo ou bolsa em geotêxtil. O segundo estágio é denominado de desaguamento ou rebaixamento, nesta etapa o material confinado pela membrana polimérica força a saída da água através do tecido permeável, enquanto as partículas sólidas ficam retidas. Ainda na segunda etapa é possível notar a significativa redução volumétrica ocasionada pela saída da água. Por fim, o terceiro estágio é chamado de fase de consolidação, onde as partículas de água se movem para fora do material sedimentado, consolidando a fase seca da torta de lodo (GUO *et al.*, 2014; SILVA, 2018). Os estágios do desaguamento podem ser visualizados na Figura 6 abaixo.

Figura 6. Estágios do desaguamento dos geotêxteis



Fonte: adaptado de Lawson (2008)

Durante a fase de enchimento do tubo geotêxtil é possível observar a formação de três zonas. Na parte superior, denominada zona de suspensão, há a presença de sólidos em suspensão presentes no meio líquido. Na zona localizada no meio do tubo, está a chamada zona de

sedimentação, e logo abaixo, a zona sedimentada. A zona de sedimentação é caracterizada por apresentar um movimento descendente de sedimentos das quais estavam anteriormente como material suspenso. A zona sedimentada é, portanto, aquela em que os sólidos se localizam depositados ao fundo da bolsa.

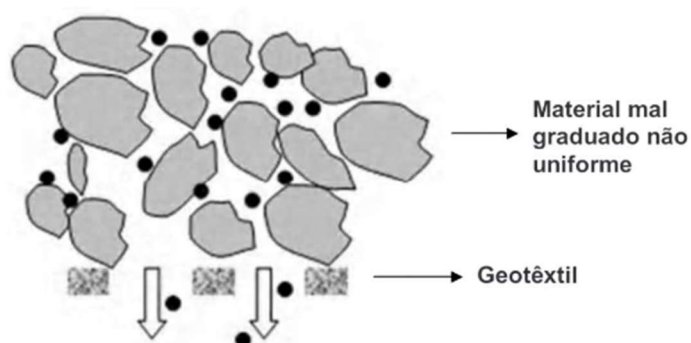
Urashima (2002), Munoz (2005), Silva (2017) e Silva (2019) citam a importância de se considerar fatores quanto às características de filtração, pois esses estão suscetíveis a problemas de ordem geotécnica. Deste modo, as partículas sólidas não consolidadas acabam interagindo com a estrutura em geotêxtil de diferentes maneiras, podendo ocasionar problemas como a erosão interna, também conhecida como *piping*, cegamento (*blinding*), ou também chamada de *filter cake* e a colmatação física (*clogging*).

Para Silva (2018), no que tange o comportamento da filtração dos materiais em geotêxtil, nos estágios iniciais do processo de desaguamento, uma dada porção de partículas de solo fino que passam pelo material geotêxtil é estritamente dependente da compatibilidade entre a abertura dos poros dos filtros geotêxteis e as partículas sólidas em suspensão. Em outras palavras, o comportamento da filtração dos lodos é controlado pelas propriedades dos materiais geotêxteis, pelas propriedades do material particulado e sob as condições das quais determinada tecnologia é utilizada.

O fenômeno da erosão interna, ou *piping*, é evidenciado pela perda de partículas finas do solo variadas ocasionando o surgimento de espaços vazios e criando condições de ruptura. Além disso, o deslocamento das partículas sólidas, quando não controladas, podem ocasionar problemas de colmatação do leito drenante (URASHIMA, 2002; MUNOZ, 2005; SILVA, 2017).

Pieper (2008), descreve que por ser um material residuário contaminado, não é interessante que haja a passagem de material particulado fino, mesmo que a sua estrutura sofra com o aumento da poro-pressão e da redução do fluxo e o conseqüente aumento do tempo de desaguamento, pois o desaguamento objetiva conter o material sólido. A Figura 7 abaixo ilustra a perda de partículas através do fenômeno da erosão interna.

Figura 7. Perda de partículas através da erosão interna



Fonte: Vidal & Urashima (1999)

O fenômeno do cegamento, ou *filter cake*, ocorre quando o material particulado fino se movimenta, segundo o processo de sufusão, em direção ao geotêxtil e se agrupam na superfície interna do tubo, formando uma fina camada de solo (MUNOZ, 2005; SILVA, 2017). Conforme pode ser observada na Figura 8 abaixo.

Figura 8. Formação do *filter cake*



Fonte: Palmeira (2003)

O fenômeno da colmatação física ocorre quando as partículas de solo individuais desaguam junto com o material fluido e ficam retidas ao longo da estrutura do filtro (SILVA, 2017). Isso ocorre devido o material de contato possuir baixa condutividade hidráulica, logo o geotêxtil não pode se tornar menos permeável do que a *filter cake*, situação essa que é facilitada devido aos caminhos preferenciais ocasionados pela concentração das fibras geotêxteis (SILVA, 2018).

Lawson (2018) afirma que para garantir um eficiente desaguamento, o recipiente de geotêxtil deve ser posicionado sobre o leito de drenagem. Abaixo do leito deve estar contido uma barreira impermeável servindo de suporte as unidades de desaguamento em geotêxtil e prevenindo a perda de líquido para os solos adjacentes.

No que diz respeito a importância do condicionamento químico, observa-se a forte necessidade por melhorar o processo de desaguamento, seja pela aglutinação das partículas em suspensão, aumentando seu peso específico e maximizando seu potencial de retenção, seja pelo aumento da velocidade do processo de desaguamento devido a diminuição da resistência a filtração. Sendo assim, tanto o tipo de condicionante empregado, quanto a sua dosagem são fatores de alta relevância nos processos de desaguamento, e sua escolha deve estar diretamente atrelada ao tipo de material a ser desaguado (SILVA, 2018; Lawson, 2018, SILVA, 2019).

Dentre os polímeros comumente empregados em processos de desaguamento de lodo, temos como principais os sais metálicos, cal e polímeros orgânicos. Segundo Di Bernardo (2017), os polímeros podem ser classificados em catiônicos, aniônicos, não iônicos e anfótericos.

Os polímeros iônicos são caracterizados pela presença de sítios ionizáveis, os catiônicos se caracterizam pela presença de sítios ionizáveis positivos, os aniônicos pela presença de sítios

ionizáveis negativos e por fim, os anfolíticos se caracterizam pela presença de sítios ionizáveis positivos e negativos.

Conforme observado no Tabela 5 abaixo, Vertematti (2015) apresenta um resumo dos principais condicionantes químicos utilizados e o seu mecanismo de funcionamento.

Tabela 5. Mecanismo de funcionamento dos principais condicionantes químicos

Coagulante ou Floculante	Função
Polímeros aniônicos	Geração de "pontes" entre partículas já coaguladas e a cadeia de polímero, gerando flocos de maior diâmetro.
Polímeros catiônicos	Neutralização das cargas elétricas superficiais que envolvem os sólidos suspensos e incremento do tamanho dos flocos formados (via formação de pontes). Usualmente utilizado no tratamento de lamas orgânicas.
Cátions	São polieletrólitos catiônicos de baixo peso molecular, os quais possuem como função principal a neutralização das cargas elétricas superficiais e aumento do tamanho dos flocos. Utilizada em substituição aos floculantes inorgânicos convencionais.
Hidróxido de Cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )	Usualmente utilizado como agente controlador do pH. Porém, alguns íons de cálcio atuam também como agentes de neutralização das cargas elétricas superficiais, funcionando como um coagulante inorgânico.
Sulfato de Alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ); Policloreto de Alumínio (PAC); Cloreto Férrico ( $\text{FeCl}_3$ ); Sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ )	Cátions polivalentes ( $\text{Al}^{3+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ , etc) neutralizam as cargas elétricas das partículas suspensas e os hidróxidos metálicos ao adsorverem as partículas, gerando uma floculação parcial.

Fonte: adaptado de Vertematti (2015)

### 3.6. Estudos sobre a eficiência de desaguamento por tubos geotêxteis

Estudos envolvendo diversos lodo submetidos a tubos e bolsas geotêxteis já foram desenvolvidos, tais como: lodo de estações de tratamento de água e esgoto, rejeitos de mineração, filtração em solo e lama asfáltica.

Martins (2006) relata em sua pesquisa sobre a utilização de tubos geotêxteis para o desaguamento de rejeitos de mineração, principalmente os materiais particulados finos (lamas), material este com características físicas distintas de outros rejeitos granulares. A utilização desses tubos em material geotêxtil apresentou, conforme demonstrado em seus resultados e discussões, resultados satisfatórios do ponto de vista ambiental, haja vista que as elevadas taxas de retenção de sólidos em curtos períodos e sem a necessidade de adição de produtos químicos puderam ser observadas.

Para Castro (2005), sua pesquisa visou a análise de sistemas de desaguamento de lodo contaminados ou não por meio de tubos geotêxteis. A aplicação do geotêxtil vem sendo difundida desde o início dos anos 80 com a fim de conter materiais granulares, construção de aterros sanitários e até uma barreira de controle de erosão. Como material auxiliar ou único em sistemas de desaguamento, seu dimensionamento fica atrelado às características do material a ser desaguado, e seus resultados amplificados com a adoção de produtos químicos e biológicos

antes e durante o processo de desaguamento. Castro (2005) cita ainda a importância da costura realizada na fábrica visando garantir um controle de qualidade elevada.

Utilizando dos ensaios de filtração em cone de geotêxtil, Ferreira e Viana (2013), conduziram estudos visando determinar a eficiência de filtração e a qualidade do filtrado obtido. Conforme observado pelos autores, nos ensaios conduzidos com lodo proveniente de decantadores, com teor de sólidos iniciais na ordem de 3,58%, apresentaram após a filtração em meio geotêxtil, concentração final de 29,65%, sendo este valor satisfatório para a disposição final do material sem a necessidade de aplicação de polímeros. Foi observado ainda no início do desaguamento, um filtrado com mais teores de sólidos suspensos, devido a formação mais tardia do *filter cake*.

Utilizando quatro diferentes tipos de tecido geotêxtil, Avancini *et al.* (2021) objetivaram avaliar a influência da utilização de polieletrólitos e a gramatura dos tecidos geotêxteis no processo de desaguamento. Avancini *et al.* (2021) ressaltam ainda a importância da determinação da dosagem ideal de polímero para um dado lodo, pois sua dosagem incorreta pode ocasionar uma ineficiência no desaguamento e consequentemente influenciar na escolha do tipo de tecido geotêxtil.

Moo-Young *et al.* (2002), estudaram o uso de tubos geotêxteis para o desaguamento de altos conteúdos de lodos e sedimentos, buscando avaliar a sua viabilidade e os possíveis fatores que os afetam, a partir da realização de 26 testes de filtração de pressão. Os autores conseguiram observar que os tubos geotêxteis em tecido apresentaram melhores taxas de filtração de grandes volumes de lodos. Além disso, a utilização dos tubos em tecido não apresentou dificuldades na retenção de material particulado.

Já o estudo conduzido por Oliveira e Vidal (2020), buscou avaliar a eficiência do desaguamento do lodo com baixos teores de sedimentos a partir da inserção de areia fina no interior dos bags geotêxteis, de modo a formar uma pequena camada de pré-filtro, simulando assim a formação dos *filter cakes*. Os resultados com areia se mostraram relevantes, podendo chegar em até 72% de ganho na eficiência a filtração.

Berilgen e Bulut (2015), realizaram estudos com o lodo dragado do fundo do mar de Istambul, na Turquia e avaliaram a eficiência do desaguamento desse lodo por meio de ensaios laboratoriais com tubo geotêxtil e a adição de diferentes polímeros catiônicos e aniônicos. Segundo os autores, a melhor dosagem encontrada por eles foi de 1,5 Kg/Tonelada de polímero e água destilada. A partir disso, Berilgen e Bulut (2015) prepararam 24 amostras de lodo dragado com os diferentes polímeros, sendo 12 amostras variando para as concentrações de 0,1; 0,5 e 1% de polímero por peso do material dragado. Já a segunda metade das amostras com concentrações variando de 0,1; 0,25 e 0,5% de polímero por peso de material dragado. Após os ensaios, os autores puderam evidenciar um excelente resultado no desaguamento do lodo



dragado, sendo o polímero catiônico aquele com os melhores resultados obtidos.

Silva e Vidal (2021), buscaram avaliar a eficiência do desaguamento de lodo nos sentidos verticais e horizontas, baseados na retenção de sólidos e no volume de lodo que flui através de três diferentes gramaturas de tubos geotêxteis. Ainda conforme os autores, foi escolhido um material sólido com distribuição granulométrica que promovesse a estabilidade interna e conseqüentemente facilitar a formação do *filter cake*. A partir da utilização de um modelo probabilístico, foi evidenciado que partículas de lodo de todas as dimensões eram possíveis de passar pelo filtro geotêxtil. Entretanto, altas eficiências de filtração e controle de perda de partículas são alcançadas quando há a formação do *filter cake* no início dos testes de filtração, onde uma gama de partículas sólidas são retidas e controlam a passagem da fração líquida e retenção da fração sólida.

No que diz respeito as altas pressões de filtração, Moo-Young *et al.* (2002), relatam que essas elevadas pressões tendem a influenciar positivamente nas taxas de desaguamento, porém acabam não contribuindo consideravelmente em uma elevada concentração de sólidos, devido a sua interferência na formação do *filter cake* e no conseqüente fator controle de retenção de material granular fino.

Taxa de desaguamento e a eficiência de desaguamento podem ser adotados como parâmetros de avaliação da capacidade dos tubos geotêxteis, sendo estes afetados por diversos fatores de ordem primário do lodo produzido e do tipo de material geotêxtil adotado (MOO-YOUNG *et al.*, 2002).

Worley *et al.* (2007) avaliaram o processo de desaguamento dos tubos geotêxteis com o auxílio de coagulantes (sulfato de alumínio) e polímeros. A adoção de compostos químicos auxiliou a separação sólido-líquida, diminuindo o tempo requerido para o processo de enchimento e desaguamento dos tubos. Foi observado também a retenção, como conseqüência da aplicação dos condicionantes químicos, de fósforo e nitrogênio orgânico na fração sólida, e o carreamento pela fração líquida de nitrogênio amoniacal e potássio.

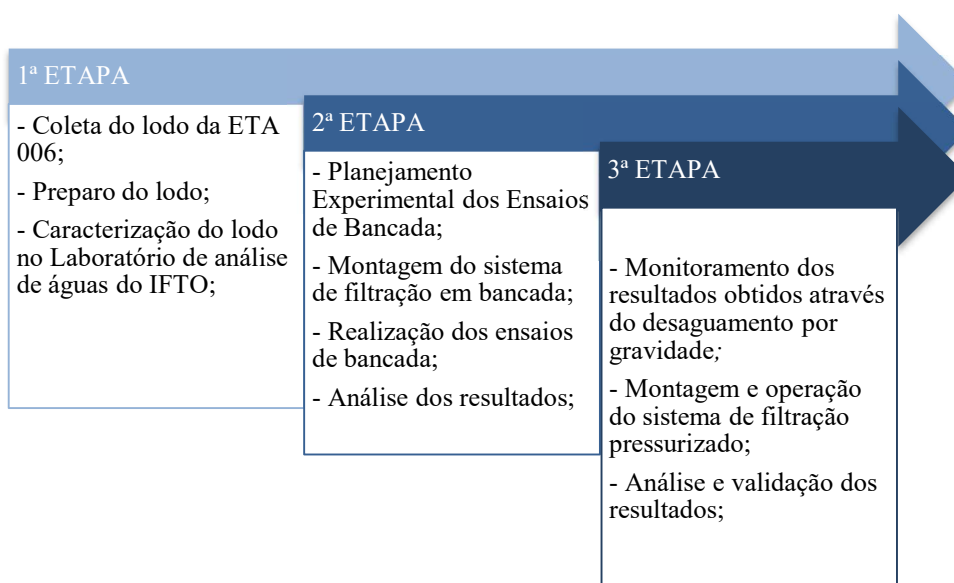
O estudo conduzido por Ardila *et al* (2020), buscou avaliar o desaguamento de lodo de ETA a partir de três gramaturas de tubo geotêxtil, levando em consideração a relação entre o Teor de Sólidos inicial do lodo e a dosagem do polímero. Testes de semi-desempenho e análise estatística foram utilizados. Os autores avaliaram ainda as mudanças nas características do material geotêxtil após o processo de desaguamento, sendo essa avaliação quantificada através de testes de permissividade e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados mostraram uma eficiência na retenção de sólidos superiores às obtidas através de processos de desaguamento mecanizados e turbidez dentro da faixa estabelecida pela norma brasileira para o lançamento de efluentes em corpos d'água de classe 2.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Planejamento de pesquisa

Visando apresentar um cronograma de planejamento da pesquisa desenvolvida, o fluxograma da Figura 9 foi dividido em 3 etapas. A 1ª ETAPA consistiu na coleta, preparo e caracterização do lodo gerado na estação de tratamento de água localizada no município de Palmas – TO. A 2ª Etapa consistiu na realização de ensaios de bancada, com utilização de material em geotêxtil no Laboratório de análise de águas do IFTO a partir das condições otimizadas de dosagens obtidas através do planejamento experimental. Por fim, a 3ª Etapa consistiu na verificação dos resultados obtidos nos ensaios de bancada, definição do polímero com o melhor ajuste ao modelo estatístico proposto (DFC), realização do ensaio de desaguamento de lodo de ETA pressurizado, e análise dos resultados obtidos.

Figura 9. Fluxograma de planejamento de pesquisa



Fonte: autor (2021)

## 4.2. Equipamentos, parâmetros e condicionantes químicos

As Tabelas 6, 7 e o Tabela 8 trazem, respectivamente, os equipamentos a serem utilizados na pesquisa, condicionantes químicos necessários a serem aplicados nos ensaios de bancada e em instalação-piloto, e os parâmetros físico-químicos e microbiológicos a serem coletados e ensaiados.

Tabela 6. Relação dos equipamentos necessários

Equipamento	Função
Jar Test - modelo: 218-6 LDB C4F4	Ensaio de mistura rápida
Analizador de Carbono Orgânico Total TOC-L - marca: SHIMADZU	Análise do carbono orgânico total (COT)
Balança eletrônica - modelo: Mark L 1002i	Pesagem de condicionantes químicos / medições de sólidos totais, SST e umidade
Cronômetro Mondaine Stop Watch	Medição de tempo
Espectrofotômetro - marca: HACH - modelo: DR 6000	Leitura de cor aparente e cor verdadeira
pHmetro - marca: Alpax - modelo: Orion Star A211	Leitura de potencial hidrogeniônico
Turbidímetro - marca: HACH - modelo: Cat. No. 2100Q01	Leitura da turbidez
Disco geotêxtil (ensaio de bancada) e bolsa geotêxtil (ensaio em instalação-piloto)	Filtragem do lodo coletado
Master Sizer 2000 - marca: Malvern	Distribuição de tamanho de partículas do lodo
Quanta 650 FEG e MED020 - marca: Bal-tec	Microscopia eletrônica de varredura e microanálise química

Fonte: adaptado de Silva (2019)

Tabela 7. Condicionantes químicos e coagulantes

Produto químico	Estado físico	Densidade da massa	Tamanho das partículas
Polímero Sintético Catiônico	Sólido granulado	-	-
Polímero Sintético Não Aniônico	Sólido granulado	0,74	> 2 mm: 2% < 0,15 mm: 6%

Fonte: adaptado de Silva (2019)

Tabela 8. Parâmetros e unidades de medida

Parâmetro	Unidade de medida	Método
Alumínio	mg/L Al	EAA-Forno de grafite
Alcalinidade	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Titrimétrico
Carbono Orgânico Total	mg/L C	Espectofotométrico infravermelho não dispersivo - NPOC
Carbono Orgânico Dissolvido	mg/L C	Espectofotométrico infravermelho não dispersivo - NPOC
Distribuição e tamanho das partículas	mm	Espalhamento de luz laser de baixo ângulo
Ferro	mg/L Fe	EAA- Chama
Manganês	mg/L Mg	EAA- Chama
Morfologia das partículas	micrometro	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
pH	Adimensional	Potenciométrico
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	Gravimétrico
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	Gravimétrico
Teor de sólidos	%	Gravimétrico
Turbidez	uT	Nefelométrico

Fonte: adaptado de Silva (2019)

### 4.3. 1ª Etapa: coleta e caracterização do lodo

O lodo coletado da ETA foi disponibilizado pela companhia de saneamento da região Norte do país. Por motivos de contrato, a companhia não permitiu a divulgação do seu nome e nem a divulgação da ETA em questão. A ETA em questão apresenta unidades de coagulação, floculação, decantação e filtração, caracterizando-a como uma ETA de ciclo completo e tem vazão média de 700 L/s. Para isso, foi coletado no tanque de equalização uma amostra com volume aproximado de 1000 L na primeira quinzena do mês de outubro de 2021 (ver Figura 10). O tanque de equalização tem como função equalizar as concentrações dos lodos oriundos da descarga do decantador (maior concentração de SST) e a água de lavagem dos filtros (menor concentração de SST).

A coleta do lodo da ETA ocorreu conforme os procedimentos descritos a seguir:

1º: O lodo presente no tanque de equalização foi agitado de modo que não houvesse sólido sedimentado no fundo do tanque.

2º Com o auxílio de um balde graduado e uma corda, foi realizado a descida do balde até o nível da lâmina de lodo;

3º Após coletado, o lodo foi armazenado em galões de 50 e 100 L até a obtenção do volume aproximado de 1000 L de “lodo matriz”

4º Após o término da coleta e armazenamento, a amostra foi encaminhada ao Laboratório de Análise de Águas do Instituto Federal do Tocantins – IFTO para a realização da caracterização físico-química do lodo.

Figura 10. Coleta e armazenamento do "lodo matriz": tanque de equalização (1), coleta e transporte do lodo em galões de 50 e 100 L (2), "lodo matriz" no laboratório de análises de águas (3)



Fonte: autor (2022)

Após a etapa de coleta, foram preparadas três amostras de lodo a partir do “lodo matriz” com diferentes concentrações (ver Figura 11). Após preparadas as concentrações de lodo de ETA, foram coletadas quatro amostras, sendo uma do “lodo matriz” e enviados ao Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP, em Ribeirão Preto – SP para a realização dos ensaios físico-químicos descritos na Tabela 8.

Figura 11. Lodos de ETA com concentrações definidas pelo planejamento experimental



Fonte: autor (2022)

Conforme definido no planejamento experimental, foram preparadas três Concentrações de Lodo de Estudo (CLE) de ETA a partir do “lodo matriz”, sendo: CLE01 de 2,50 g/L, CLE02 de 10,50 g/L e CLE03 de 18,50 g/L de SST.

#### 4.4. 2ª Etapa: planejamento experimental e ensaios de bancada

Previamente aos ensaios de bancada, foi realizado o planejamento experimental de modo a definir a melhor ferramenta estatística visando a otimização dos ensaios e resultados.

Nesta etapa, foi definido a metodologia conhecida como *Response Surface Methodology* (RSM), por meio do Delineamento de Face Centrada (DFC). Através da otimização dos resultados, o DFC buscou auxiliar na avaliação da influência dos parâmetros: tipo de polímero, dosagem do polímero e a concentração inicial de SST no processo de desaguamento do lodo de ETA.

Através do software *Protimiza Experimental Design*, que utiliza abordagem numérica quantitativa para as variáveis independentes, foram inseridos os parâmetros de dosagem do polímero e a concentração inicial de SST do lodo. O parâmetro tipo de polímero é do tipo qualitativo, não sendo possível a sua utilização por meio do DFC.

Diante disso, ficou definido a utilização das duas variáveis independentes, com as suas condições experimentais e seus níveis reais e codificados conforme segue na Tabela 9 abaixo.

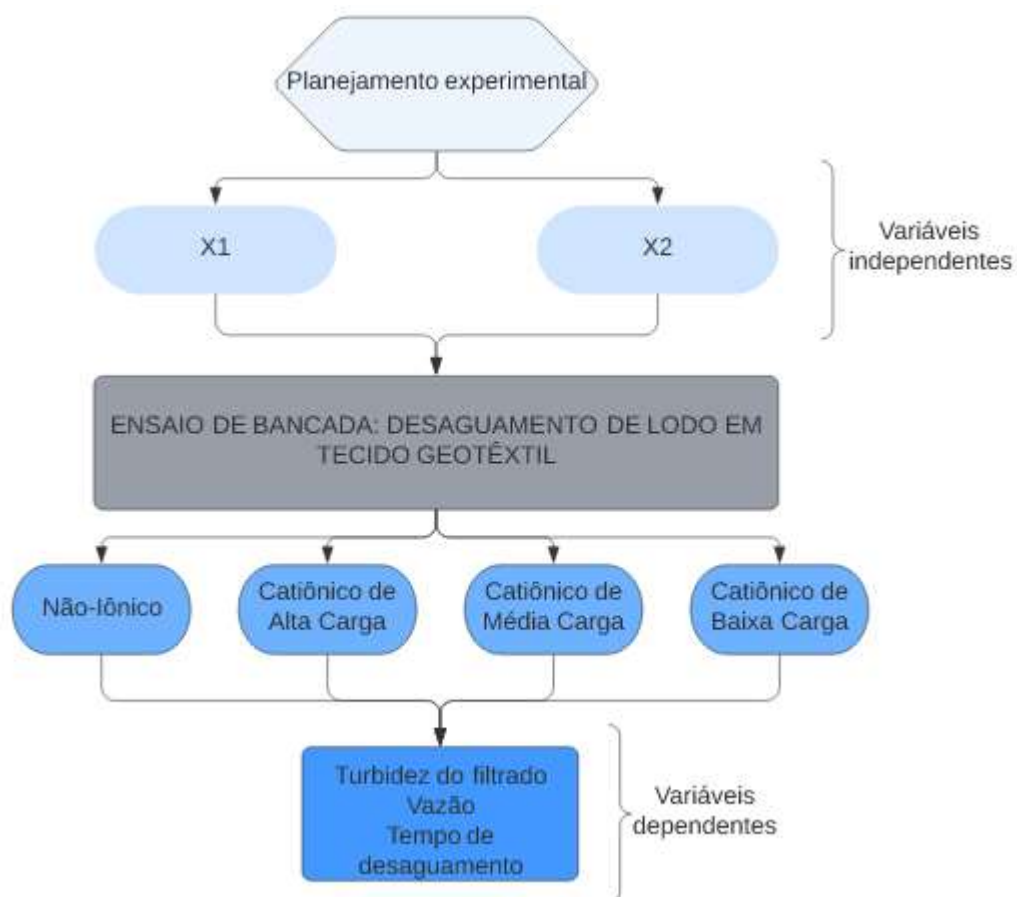
Tabela 9. Condições experimentais das variáveis independentes

Variável quantitativa	Código da variável	Níveis		
		-1	0	+1
SST inicial do lodo (g/L)	X <sub>1</sub>	2,50	10,50	18,50
Dosagem do polímero (mgPol/gSST)	X <sub>2</sub>	1,50	3,75	6,00

Fonte: autor (2022)

Os valores máximos (+1) e médios (0) da variável X<sub>1</sub> (SST inicial do lodo) buscou simular o lodo característico das etapas de descarga dos decantadores e do tanque de equalização, respectivamente. Já o valor mínimo (-1), buscou simular o lodo característico da etapa de lavagem dos filtros. Por fim, no que diz respeito aos valores definidos na variável X<sub>2</sub> (dosagem do polímero), estes se basearam na literatura.

Após a definição das variáveis independentes (X<sub>1</sub> e X<sub>2</sub>), buscou-se obter os valores para as variáveis dependentes (Y), que são definidas segundo a NBR 14.653-2 como uma variável cujo comportamento é explicado pelas variáveis independentes. A Figura 12 abaixo traz uma representação esquemática do planejamento experimental, levando em consideração as variáveis de entrada (independentes), e as variáveis resposta (dependentes).



Fonte: autor (2022)

O ensaio de desaguamento de lodo por gravidade foi dividido em quatro rodadas de 11 ensaios, totalizando 44 ensaios, sendo que em cada rodada foi utilizado um polímero com características diferente, conforme descrito na Tabela 10 abaixo. Na Tabela 11 é possível visualizar o planejamento dos ensaios realizados para o DFC para cada polímero ensaiado.

Tabela 10. Condicionantes químicos utilizados

Produto químico	Nome comercial	Estado físico	Peso molecular	Carga	Densidade da massa (kg/m <sup>3</sup> )
Polímero Não-Iônico	CHEMIFLOC 3001-X	Sólido branco granulado	Alto	Não iônica	720
Polímero Catiônico	CHEMIFLOC 9080-X	Sólido branco granulado	Alto	Alta	800
Polímero Catiônico	CHEMIFLOC 9040-X	Sólido branco granulado	Alto	Média	800
Polímero Catiônico	CHEMIFLOC 9020-X	Grânulos brancos	Alto	Baixa	800

Fonte: autor (2022)

Tabela 11. Delineamento de Face Centrada para os ensaios de bancada em tecido geotêxtil

Ensaio	Variáveis	
	X1 - SST inicial do lodo (g/L)	X2 - Dosagem de polímero (mgPol/gSST)
1	-1 (2,50)	-1 (1,50)
2	1 (18,50)	1 (6,00)
3	-1 (2,50)	-1 (1,50)
4	1 (18,50)	1 (6,00)
5	-1 (2,50)	-1 (1,50)
6	1 (18,50)	1 (6,00)
7	0 (10,50)	0 (3,75)
8	0 (10,50)	0 (3,75)
9	0 (10,50)	0 (3,75)
10	0 (10,50)	0 (3,75)
11	0 (10,50)	0 (3,75)

Fonte: autor (2022)

As propriedades físicas do tecido geotêxtil do tipo GT1, da fabricante Huesker, utilizados nos ensaios de bancada tanto a gravidade, quanto pressurizado, definido através do planejamento experimental, encontram-se descritos na Tabela 12 abaixo.

Tabela 12. Propriedades físicas dos geotêxtil ensaiado

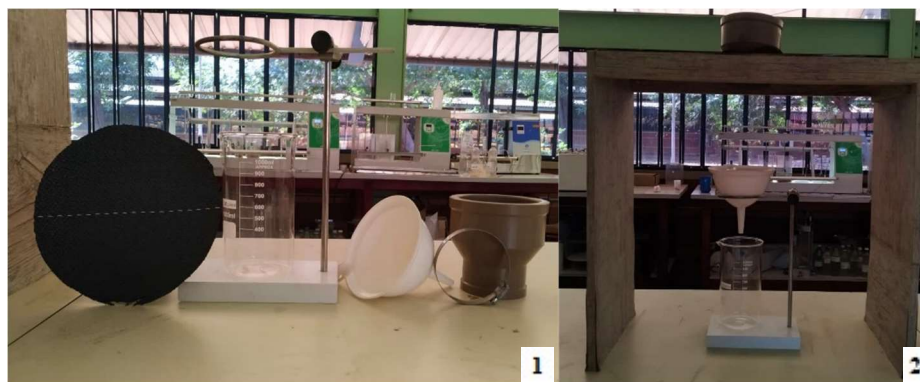
Propriedades	Geotêxtil 1 (GT1): PP 105/105 DW
Matéria-prima	Polipropileno
Massa por unidade de área (EN ISO 9864)	445 g/m <sup>2</sup>
Resistência a tração nominal (EN ISO 10.319)	≥ 105 kN/m
Deformação na Resistência Nominal (EN ISO 10.319)	≤ 9%
Permeabilidade (EN ISO 11.058)	25.10 <sup>-3</sup> m/s
Tamanho da abertura (NBR 12.956)	200 µm

Fonte: Huesker (2018)

O sistema de filtração em geotêxtil consistiu em um conjunto de equipamentos de baixo custo e fácil aplicação. Para isso, foram necessários os seguintes equipamentos: redução de 75x50 mm em PVC, abraçadeira metálica, filtro geotêxtil do tipo GT1, funil, becker de vidro graduado, suporte universal com anel para funil e suporte de madeira, conforme pode ser observado na Figura 13.



redução de PVC 75x50 mm e abraçadeira metálica (1); equipamento de filtração montado (2).



Fonte: autor (2022)

O ensaio de bancada foi realizado conforme metodologia descrita por Miratech (2005) e Lawson (2006), que buscou a quantificação em porcentagem da fração sólida retida no filtro geotêxtil e a qualidade do material filtrado. Para isso, foram realizados os seguintes procedimentos (ver Figura 14):

- Homogeneização do lodo na concentração requerida, conforme planejamento experimental, e preparada uma amostra de 500 ml de lodo no recipiente do *jar test*;
- Preparação do polímero conforme definido no planejamento experimental nas concentrações de 1,5 mgPol/gSST, 3,75 mgPol/gSST e 6 mgPol/gSST;
- Programação do *jar test* para a rotação de 192 rpm e tempo de 120 segundos;
- Após a mistura no *jar test* foram filtradas as amostras no equipamento de bancada com filtro geotêxtil do tipo GT1 e registrados os volumes a cada 10 segundos de ensaio. O término de cada ensaio ficou condicionado a diferença de no mínimo 15 segundos entre as gotas do filtrado;
- Por fim, foi realizado a contagem volumétrica para cada rodada de testes, e anotado os valores de turbidez do filtrado composto.

Figura 14. Ensaio de bancada: agitação do lodo com adição de polímero (1), equipamento de filtração em bancada durante o desaguamento do lodo floculado (2).



Fonte: autor (2022)

Com a realização do ensaio de filtração por gravidade, foi utilizada a metodologia de

superfície de resposta com o objetivo de validar estatisticamente a influência das variáveis SST inicial do lodo e dosagem do polímero. Para o tratamento estatístico das variáveis resposta gerados, foi utilizado o software *Protimiza Experimental Design* para a análise da significância de cada variável dependente, identificada como *p-value*. A partir da existência de significância estatística, foi elaborado um modelo matemático que correlacionasse as variáveis independentes com as variáveis dependentes, verificando-se a adequação dos valores preditos com os valores observados, e a partir disso, gerados os gráficos de superfície de resposta para cada índice de desempenho.

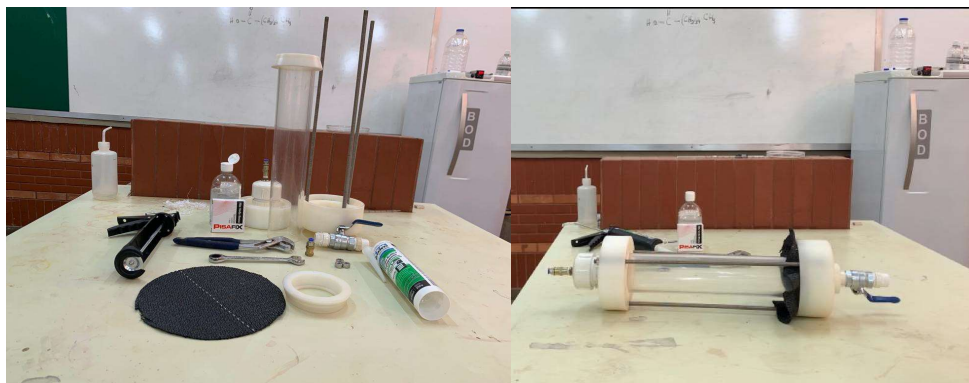
#### **4.5. 3ª Etapa: planejamento experimental ensaio por filtração pressurizada**

Tal como na realização dos ensaios de bancada por gravidade, foi realizado um planejamento experimental para o ensaio com filtro pressurizado em geotêxtil (FPG). O planejamento experimental visou definir a uma ferramenta estatística que melhor interpretasse os resultados obtidos a partir do experimento.

Deste modo, foi definido a metodologia conhecida como *Response Surface Methodology* (RSM), por meio do Delineamento de Face Centrada (DFC). Através da otimização dos resultados, o DFC buscou auxiliar na avaliação da influência dos parâmetros: dosagem do polímero e concentração inicial de SST no processo de desaguamento do lodo de ETA. O planejamento definido pode ser visualizado na Tabela 11.

Com relação as variáveis resposta, diferentemente do planejamento experimental para o ensaio de bancada a gravidade, este buscou avaliar os resultados de Turbidez do filtrado, Vazão de desaguamento, Tempo de desaguamento, Teor de sólidos do material sólido retido e a porcentagem de umidade no lodo retido no filtro geotêxtil. No ensaio por filtração pressurizada, foi adotado o polímero com melhores resultados estatísticos obtidos no ensaio por gravidade, portanto, utilizou-se o polímero Não-iônico, cujas informações encontram-se detalhadas na Tabela 10.

Com a definição do planejamento experimental, foram seguidas as recomendações metodológicas propostas por Queiroz (2019) e Khachan e Bhatia (2016). Para que esse sistema de filtração fosse realizado, foi necessário a montagem do circuito em bancada com os seguintes equipamentos: suporte de madeira, tecido geotêxtil do tipo GT1, compressor Schulz modelo CSA8,2, mangueira pneumática 6x4 mm, manômetro 10 kpa, funil e becker de vidro graduado. O sistema pressurizado consistiu em um tubo de acrílico de 76 mm de diâmetro por 500 mm de altura fechado com duas flanges e uma abertura roscável (ver Figura 15).



Fonte: autor (2022)

O ensaio do FPG seguiu a seguinte sequência de procedimentos (ver Figura 16):

- Homogeneização do lodo na concentração requerida, conforme planejamento experimental, e preparada uma alíquota de 500 ml de lodo no recipiente do *jar test*;
- Preparação do polímero conforme definido no planejamento experimental nas concentrações de 1,5 mgPol/gSST, 3,75 mgPol/gSST e 6 mgPol/gSST;
- Programação do *jar test* para a rotação de 192 rpm e tempo de 120 segundos;
- Aplicação das dosagens de polímero nas amostras de lodo e início da agitação no *jar test*;
- Após a mistura no *jar test* foi despejado a mistura de lodo com polímero no filtro pressurizado em geotêxtil e fechado de modo a evitar espaços para saída do ar confinado;
- Foi ajustado a pressão de 1,45 Psi com o auxílio de um manômetro e então aberto o registro de descarga para o início da filtração;
- Durante o desaguamento, foram coletados os volumes do material filtrado para cada 10 segundos de ensaio, finalizando o ensaio quando as gotas do filtrado eram inferiores a uma gota a cada 20 segundos;
- Por fim, foi realizado as análises dos parâmetros de turbidez do filtrado, tempo e vazão do filtrado, teor de sólidos e umidade no lodo retido pelo tecido geotêxtil.

Tal como no ensaio de filtração por gravidade, no ensaio com filtro pressurizado em geotêxtil foi utilizada a metodologia de superfície de resposta com o objetivo de validar estatisticamente a influência das variáveis SST inicial do lodo e dosagem do polímero, a partir da análise de adequabilidade dos valores preditos com os valores observados e gerando-se gráficos de superfície de respostas para os índices de desempenho.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o capítulo em questão, foi seguido a formatação de artigo de revista, divididos em dois principais artigos. O primeiro artigo intitulado de Avaliação do desaguamento do lodo de ETA obtido através da filtração por gravidade em tecido geotêxtil com aplicação da metodologia de superfície de resposta. Já o segundo artigo ficou intitulado de Avaliação do desaguamento do lodo de ETA obtido através da filtração pressurizada em tecido geotêxtil com aplicação da metodologia de superfície de resposta.

### **5.1. Artigo 01: Avaliação do desaguamento do lodo de ETA obtido através da filtração por gravidade em tecido geotêxtil com aplicação da metodologia de superfície de resposta.**

#### **Resumo**

Discussões a respeito da gestão do lodo de ETA têm sido pauta em diversas reuniões e trabalhos científicos, sendo essa gestão uma problemática de nível ambiental, social e financeiro. Devido a sua dificuldade logística e operacional, têm sido cada vez mais aplicadas técnicas de confinamento em tubo geotêxtil. Responsáveis pela redução volumétrica e estabilização da fração sólida, essa técnica de desaguamento reduz os impactos ambientais e gera uma maior economia energética quando comparados a outros processos de desaguamento. Entretanto, ainda se faz necessário a realização de estudos acerca de seu funcionamento e suas particularidades. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito das variáveis no processo de desaguamento do lodo de ETA por meio do planejamento experimental. O estudo foi dividido em duas etapas: coleta, preparo e caracterização dos lodos da estação de tratamento de água localizada no município de Palmas – TO e ensaios de bancada com tecido geotêxtil. Os resultados mostraram que os teores de sólidos suspensos totais (SST) dos lodos e a tipologia e dosagem dos condicionantes químicos utilizados exerceram influência na quantidade de lodo sólido retido pelo tecido geotêxtil, bem como no tempo de desaguamento. Dentre os polímeros utilizados, aquele que obteve a maior significância estatística para os parâmetros de Turbidez e Tempo de desaguamento foi o polímero não-iônico 3001-X. Vale destacar ainda a eficiência na turbidez do filtrado com a utilização do polímero catiônico 9080-X, que apresentou elevada significância estatística para esse parâmetro.

**Palavras-chave:** Polímero, desaguamento, lodo de ETA, planejamento experimental, tecido geotêxtil.

#### **Abstract**

Discussions about WTP stake management have been in several meetings and scientific work, and this management is an environmental, social, and financial problem. Due to its logistical and operational difficulty, containment techniques in geotextile tubes have increased. Responsible for

volumetric reduction and stabilization of solid fraction, this dewatering technique reduces environmental impacts and generates better energy savings when compared to other dewatering processes. However, studies about its functioning and its particularities are still necessary. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of variables on the process of WTP dewatering stake through experimental planning. The study had two stages: collection, preparation, and characterization of residues from the water treatment plant WTP located in the municipality of Palmas – TO and semi-performance tests with geotextile fabric. The results showed that the total suspended solids (TSS) contents of the residues and the typology and dosage of the chemical conditions used influenced the amount of solid residue retained by the geotextile fabric, as well as on the dewatering time. Among the polymers used, the one that obtained the highest statistical significance regarding the Turbidity and Dewatering Time parameters was the non-ionic polymer 3001-X. It is also worth highlighting the efficiency in the turbidity of the filtrate with the use of cationic polymer 9080-X, which presented high statistical significance for this parameter.

**Key Words:** Chemical conditioning, dewatering, WTP sludge, experimental planning, geotextile fabric.

### **Introdução**

A crescente geração de lodo em Estações de Tratamento de Água tem entrado em discussão nas últimas décadas. Atividades industriais, ocupações irregulares de áreas de proteção e a poluição de mananciais são algumas das causas de degradação das fontes de água superficiais. No Brasil, grande parte das ETAs frequentemente descartam o lodo em corpos hídricos, afetando diretamente a qualidade dos mananciais, aumentando o consumo de condicionantes químicos e consequentemente elevando a produção de lodo nessas ETAs. (ARDILA *et al*, 2020; DI BERNARDO E DANTAS, 2017; NIELSEN, 2015; OLIVEIRA E VIDAL, 2020).

Constituídos em sua maioria por água, os lodos advindos de ETAs possuem ainda uma fração de sólidos suspensos de origem orgânica e inorgânica, e produtos químicos oriundos do seu processo de purificação. Por se tratar de um material com baixo teor de sólidos e de difícil logística operacional, faz-se necessário a utilização de técnicas de desaguamento para a redução volumétrica e estabilização do lodo. Como alternativa de rápida solução e elevado custo-benefício, alguns autores como Lawson (2008), Berilgen e Bulut (2015), Ardila *et al*. (2020) e Oliveira e Vidal (2020) relatam o crescente aumento do uso de tubos geotêxteis como uma alternativa para o desaguamento do lodo, em decorrência das suas elevadas propriedades hidráulicas, menor dependência com relação aos fatores meteorológicos e fácil confecção e transporte.

Confeccionados a partir de uma malha multifilamento de polipropileno flexível com pequenos orifícios, os tubos geotêxteis realizam o processo de drenagem da fração líquida e

confinamento da fração sólida, proporcionando a redução do volume original e facilitando os processos subsequentes (SILVA *et al.*, 2020; BARROSO, 200; QUEIROZ, 2019).

Com o objetivo de aperfeiçoar os métodos e técnicas de desaguamento por tubos geotêxteis, diversas pesquisas vêm sendo conduzidas, levando em consideração características diversas, como a aplicação de condicionantes químicos, do tipo de lodo a ser desaguado, da gramatura dos tecidos geotêxteis, do sentido e tipo de filtração. Estudos como o de Silva e Vidal (2021), buscaram avaliar a eficiência do desaguamento por tubos geotêxteis nos sentidos verticais e horizontais e a influência da gramatura de três diferentes tipos de geotêxtil. Já o estudo conduzido por Berilgen e Bulut (2015), avaliou a influência de diferentes polímeros no processo de desaguamento de lodo em tubos geotêxteis

Visando a avaliação de ensaios de bancada em sistemas confinados, diversos pesquisadores e profissionais da área têm aplicado metodologias de ensaios que se assemelham no quesito de desempenho de desaguamento. Ensaios de cone, testes de filtração pressurizada e testes de filtração a gravidade são alguns dos ensaios de bancada mais utilizados por esses pesquisadores (LIAO E BHATIA, 2005; LAWSON, 2008; SILVA *et al.*, 2019; QUEIROZ *et al.*, 2019).

Conhecidos por serem de rápida e fácil aplicação, os ensaios de bancada permitem a análise das percentagens de material retido no geotêxtil e a análise da fração líquida filtrada. Ao trabalhar com lodo, geralmente é aplicado um polímero para que este facilite o processo de retenção da fração sólida, a partir da aglutinação de partículas de solo fino (solos argilosos), permitindo assim a filtragem da fração líquida, com um clarificado de baixa turbidez.

A análise das características físico-químicas do lodo é de extrema importância na determinação do material geotêxtil a ser empregado, bem como na escolha do melhor polímero para cada situação. Tais informações permitem determinar a melhor combinação de técnicas e materiais no processo de desaguamento, dentro de uma perspectiva econômica, ambiental e técnica.

Portanto, o objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos das variáveis concentração de sólidos, tipo de polímero e concentração de polímero no processo de desaguamento do lodo na estação de tratamento de água a partir da utilização de ferramenta estatística de planejamento experimental.

## **Materiais e Métodos**

Conforme mostrado na Figura 16, na Etapa 01 foi realizado a coleta, preparo e caracterização do lodo da ETA 006, já na Etapa 02 foram realizados o planejamento experimental e os ensaios de bancada.

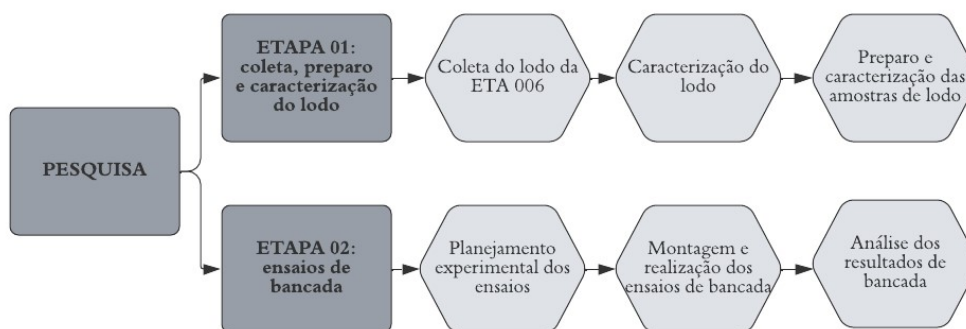


Figura 16. Fluxograma de procedimentos

Para realização dos ensaios de bancada, adotou-se a parametrização segundo os métodos descritos no ALPHA (2017). A Tabela 13 abaixo apresenta os parâmetros físico-químicos utilizados, bem como as suas unidades de medida, metodologia de ensaio e limites de detecção. A Tabela 14 traz a descrição dos condicionantes químicos utilizados e a Tabela 15 apresenta as propriedades físicas do material geotêxtil utilizado no ensaio de bancada.

Tabela 13: Parâmetros, métodos e limites de medição

Parâmetro	Unidades	Método	Limite de detecção
Alumínio	mg/L Al	EAA-Forno de grafite	0.001
Alcalinidade	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Titrimétrico	1
Carbono orgânico total	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo	0.1
Carbono orgânico dissolvido	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo	0.1
Ferro	mg/L Fe	EAA - Chama	0.01
Manganês	mg/L Ma	EAA - Chama	0.001
pH	Adimensional	Potenciométrico	0.01
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1

Tabela 14: Produtos químicos utilizados como condicionantes químicos

Produto químico	Nome comercial	Estado físico	Peso molecular	Carga	Densidade da massa (kg/m <sup>3</sup> )
Polímero Não-Iônico	CHEMIFLOC 3001-X	Sólido branco granulado	Alto	Não iônica	720
Polímero Catiônico	CHEMIFLOC 9080-X	Sólido branco granulado	Alto	Alta	800
Polímero Catiônico	CHEMIFLOC	Sólido	Alto	Média	800

	9040-X	branco granulado			
Polímero Catiônico	CHEMIFLOC 9020-X	Grânulos brancos	Alto	Média	800

Fonte: Matryx, (2021)

Tabela 15: Propriedades físicas dos geotêxteis ensaiados

Propriedades	Geotêxtil 1 (GT1): PP 105/105 DW
Matéria-prima	Polipropileno
Massa por unidade de área (EN ISO 9864)	445 g/m <sup>2</sup>
Resistência a tração nominal (EN ISO 10.319)	≥ 105 kN/m
Deformação na Resistência Nominal (EN ISO 10.319)	≤ 9%
Permeabilidade (EN ISO 11.058)	25.10 <sup>-3</sup> m/s
Tamanho da abertura (NBR 12.956)	200 μm

Fonte: Huesker, (2021)

A coleta do lodo foi realizada no primeiro semestre do ano de 2022, onde foi retirada uma amostra do lodo presente no tanque de equalização da estação de tratamento em questão. A escolha do lodo de ETA contido no tanque de equalização se deu pela presença das características dos lodos oriundos das duas principais etapas de geração de lodo em uma estação de tratamento de água de ciclo completo, os decantadores e a água de lavagem dos filtros. A partir dessa coleta, foi obtido um “lodo matriz” (ver Figura 17) com volume suficiente para a realização dos ensaios de bancada em geotêxtil e os ensaios de caracterização físico-química do material.



Figura 17. Lodo matriz coletado e armazenado em barris.

A coleta do lodo no tanque de equalização se deu a partir do acesso à passarela e então realizada a descida de um balde coletor com o auxílio de uma corda e coletado o volume de lodo de aproximadamente 25 L, repetindo-se o procedimento até que se obtivesse um volume de lodo matriz aproximado de 1000 L. Após 24 horas em repouso, foi drenado parte do sobrenadante de modo que o “Lodo Matriz” obtivesse concentração de SST próximo de 35 g/L.

Os ensaios de bancada foram realizados no Laboratório de Saneamento do IFTO, Palmas



- TO, e as análises físico-químicas, realizadas no Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP, em Ribeirão Preto – SP. As análises seguiram a metodologia descrita em APHA (2017), conforme detalhada na Tabela 1.

A partir do “Lodo Matriz” foram preparadas três Concentrações de Lodo de Estudo (CLE), a CLE 01 de 2,5 g/L, a CLE 02 de 10 g/L e a CLE 03 de 18,5 g/L. Após preparado, foi realizado o ensaio de Sólidos Suspensos Totais para conferir se as concentrações estavam dentro dos valores determinados (ver Figura 18). Foi realizado ainda o planejamento experimental do tipo Delineamento Composto de Face Centrada (DCFC), que visa observar a influência das variáveis: Sólidos Suspensos Totais (SST) e dosagem de polímero, durante o ensaio de filtração em geotêxtil. O DCFC gerou modelos das variáveis que comprovadamente tiveram influência no desaguamento do lodo durante a realização dos ensaios de bancada com geotêxtil.



Figura 18. Coleta do Lodo Matriz e armazenamento (1), preparo das concentrações de lodo definidas

Para o referido planejamento experimental, buscou-se avaliar a eficiência dos polímeros catiônicos de alta, média e baixa carga, além do polímero não-iônico. Deste modo, analisaram-se os resultados de turbidez e tempo de desaguamento para cada ensaio de bancada realizado com os diferentes polímeros. A análise estatística se deu por meio do software *Protimiza Experimental Design* (Rodrigues e Costa, 2014). Seus parâmetros de controle encontram-se apresentados na Tabela 5, conforme descrito por Rodrigues e Lemma (2014).

O sistema de filtração em geotêxtil consistiu em um conjunto de equipamentos de baixo custo e fácil aplicação. Para isso, foram necessários os seguintes equipamentos: redução de 75x50 mm em PVC, abraçadeira metálica, filtro geotêxtil (GT1), funil, becker graduado de vidro, suporte universal com anel para funil e suporte de madeira, conforme pode ser observado na Figura 19 abaixo.

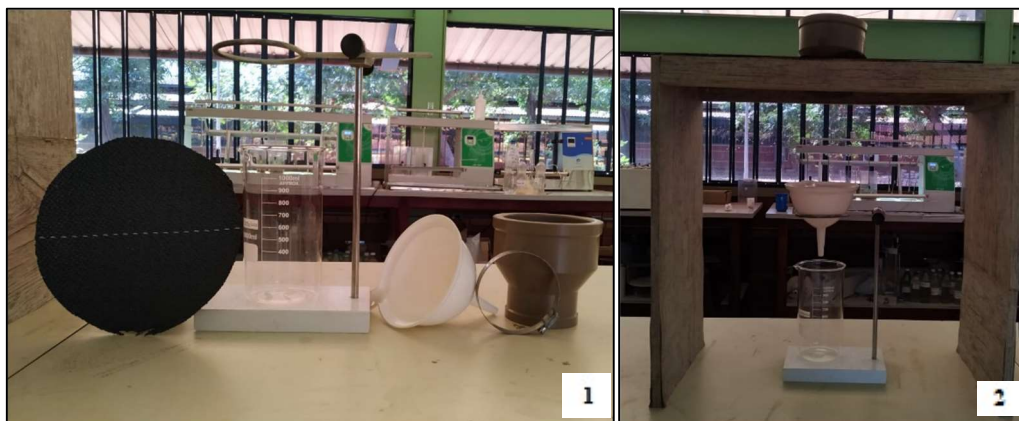


Figura 19. Equipamentos para filtração em bancada: tecido geotêxtil, suporte universal, becker graduado, funil, redução de PVC 75x50 mm e abraçadeira metálica (1); equipamento de filtração montado (2).

O ensaio de bancada foi realizado conforme metodologia descrita por Miratech (2005) e Lawson (2006), que buscou a quantificação em porcentagem da fração sólida retida no filtro geotêxtil e a qualidade do material filtrado. Para isso, foram realizados os seguintes procedimentos (ver Figura 20):

- Homogeneização do lodo na concentração requerida conforme planejamento experimental, retirada de uma amostra de 500 ml e colocada no recipiente do *jar test*;
- Preparação do polímero conforme definido no planejamento experimental nas concentrações de 1,5 mgPol/gSST; 3,75 mgPol/gSST e 6 mgPol/gSST;
- Programação do *jar test* para a rotação de 192 rpm e tempo de 120 segundos, conforme definido por Souza (2022);
- Após a mistura no *jar test*, foram filtradas as amostras no equipamento de bancada com filtro geotêxtil do tipo GT1, e registrados os volumes a cada 10 segundos de ensaio. O término de cada ensaio ficou condicionado conforme proposto por Souza (2022), da qual se deu após 15 segundos de intervalo entre as gotas;
- Por fim, foi realizado a contagem volumétrica para cada rodada de teste e anotado os valores de turbidez do filtrado composto.



Figura 20. Ensaio de bancada: agitação do lodo com adição de polímero (1), equipamento de filtração em bancada durante desaguamento do lodo floculado (2).

## Resultados e Discussões

A Tabela 16 traz os resultados das análises físico-químicas para o “Lodo Matriz” e as três amostras com concentrações de 2,5; 10 e 18,5 g/L, respectivamente. É possível observar a tendência de aumento nos parâmetros de Carbono Orgânico Total (COT), manganês e turbidez conforme o aumento da concentração de SST nas amostras de lodo preparadas.

Tabela 16: Resultados da Caracterização físico-química dos lodos de estudo

Parâmetro	Lodo Matriz	CLE 01 (18,50 g/L)	CLE 02 (10,00 g/L)	CLE 03 (2,50 g/L)
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	14	18	22	17
COD (mg/ L C)	8,442	8,474	8,982	7,821
COT (mg/ L C)	246	532	206	85
Manganês (mg/ L Mn)	29,36	4,43	3,15	0,94
pH	6,44	6,65	6,8	6,86
SST (mg/ L)	46782	8006	4263	2492
ST (mg/ L)	46910	8136	4730	2580
STD (mg/ L)	128	130	107	88
Ferro (mg/L Fe)	17964	2777	1627	1025
Alumínio (mg/L Al)	0,16	0,34	0,4	0,2

Fonte: Autor (2022)

Visando a otimização do desaguamento do lodo da ETA em questão e a adequação do modelo matemático, foi utilizado o delineamento composto de face centrada (DCFC) em conjunto com a ANOVA. Neste modelo, foram consideradas duas variáveis, a primeira referente a concentração inicial de SST ( $X_1$ ) e a segunda referente a dosagem do polímero ( $X_2$ ). Com os resultados das variáveis  $X_1$  e  $X_2$ , foi possível realizar o cálculo dos coeficientes de regressão e a construção do modelo matemático para as variáveis de resposta: tempo de desaguamento e a turbidez do filtrado.

Adotando-se uma significância estatística de 90% de confiança ( $p\text{-value} \leq 0.10$ ), foram elaborados os modelos matemáticos que correlacionam as variáveis independentes  $X_1$  e  $X_2$  com as variáveis dependentes turbidez e tempo de desaguamento para os quatro polímeros utilizados.

Os coeficientes de regressão e desvios padrão das respostas observadas para os quatro polímeros utilizados pode ser observados nas Tabela 17, 18, 19 e 20 abaixo.

É possível observar ainda nas Tabelas 17, 18, 19 e 20, o tratamento estatístico para os resultados de Turbidez do filtrado e Tempo de desaguamento para os quatro condicionantes químicos utilizados. Vale destacar que valores com P-valor abaixo de 0,100 indicam a presença de efeito estatístico para as variáveis independentes a partir dos resultados obtidos pelas variáveis dependentes, a um nível de confiança de 90%.

Tabela 17. Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9080-X.

Polímero Catiônico - 9080-X									
Turbidez do Filtrado (uT)					Tempo de Desaguamento (s)				
Termo	Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor	Termo	Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor
Média	34,76	38,02	0,91	0,3818	Média	804,95	162,87	4,94	0,0043
X <sub>1</sub>	-98,28	34,70	2,83	0,0462	X <sub>1</sub>	252,33	129,62	1,95	0,1091
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-25,39	57,39	-0,44	0,6766	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-58,37	199,48	-0,29	0,7816
X <sub>2</sub>	-149,51	37,29	-4,01	0,0102	X <sub>2</sub>	352,00	129,62	2,72	0,0420
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	172,45	57,39	3,00	0,2990	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	147,63	199,48	0,74	0,4925
X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	160,32	45,67	3,51	0,0171	X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	244,25	158,75	1,54	0,1845

Na Tabela 17, referente ao polímero Catiônico 9080-X, é possível observar que os termos quadráticos X<sub>1</sub><sup>2</sup> e X<sub>2</sub><sup>2</sup>, e a média, não apresentaram significância estatística abaixo de 0,100 (p-valor < 0,100) para a variável Turbidez. Já para o Tempo de desaguamento, os termos quadráticos X<sub>1</sub><sup>2</sup> e X<sub>2</sub><sup>2</sup>, o termo linear X<sub>1</sub> e a interação entre variáveis X<sub>1</sub>\*X<sub>2</sub> não foram estatisticamente significativos.

Tabela 18. Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9040-X.

Polímero Catiônico - 9040-X									
Turbidez do Filtrado (uT)					Tempo de Desaguamento (s)				
Termo	Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor	Termo	Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor
Média	30,71	45,75	0,67	0,5319	Média	365,47	26,64	13,72	0,0000
X <sub>1</sub>	-66,21	36,41	-1,82	0,1287	X <sub>1</sub>	252,50	21,20	11,91	0,0001
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	36,53	56,03	0,65	0,5432	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	71,82	32,63	2,20	0,0790
X <sub>2</sub>	-70,39	36,41	-1,93	0,1110	X <sub>2</sub>	119,83	21,20	5,65	0,0024
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	73,23	56,03	1,31	0,2481	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-59,18	32,63	-1,81	0,1295
X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	118,08	44,59	2,65	0,0455	X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	134,75	25,97	5,19	0,0035

Na Tabela 18, referente ao polímero Catiônico 9040-X, é possível observar que apenas a interação entre variáveis X<sub>1</sub>\*X<sub>2</sub> apresentou significância estatística abaixo de 0,100 (p-valor < 0,100) para a variável Turbidez. Já para o Tempo de desaguamento, o termo quadrático X<sub>2</sub><sup>2</sup> não foi estatisticamente significativo.

Tabela 19. Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9020-X.

Polímero Catiônico - 9020-X									
Turbidez do Filtrado (uT)					Tempo de Desaguamento (s)				
Termo	Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor	Termo	Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor
Média	47,21	6,12	7,71	0,0006	Média	357,37	45,03	7,94	0,0005
X <sub>1</sub>	-3,67	4,87	-0,75	0,4855	X <sub>1</sub>	237,67	35,84	6,63	0,0012
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-33,63	7,50	-4,49	0,0065	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-23,42	55,15	-0,42	0,6888
X <sub>2</sub>	-8,51	4,87	-1,75	0,1412	X <sub>2</sub>	192,50	35,84	5,37	0,0030
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	24,99	7,50	3,33	0,0207	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	89,08	55,15	1,62	0,1672
X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	16,58	5,97	2,78	0,0389	X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	171,25	43,89	3,90	0,0114

Na Tabela 19, referente ao polímero Catiônico 9020-X, é possível observar que os termos lineares X<sub>1</sub> e X<sub>2</sub> não apresentaram significância estatística abaixo de 0,100 (p-valor < 0,100) para a variável Turbidez. Já para o Tempo de desaguamento, os termos quadráticos X<sub>1</sub><sup>2</sup> e X<sub>2</sub><sup>2</sup> não foram estatisticamente significativos.

Tabela 20. Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero não-iônico 3001-X.

Polímero Não-iônico - 3001-X									
Turbidez do Filtrado (uT)					Tempo de Desaguamento (s)				
Termo	Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor	Termo	Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor
Média	62,42	4,72	13,23	0,0000	Média	417,53	49,12	8,50	0,0004
X <sub>1</sub>	12,00	3,76	2,20	0,0241	X <sub>1</sub>	175,17	39,09	4,48	0,0065
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-22,15	5,78	-3,83	0,0122	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	15,18	60,16	0,25	0,8108
X <sub>2</sub>	14,87	3,76	3,96	0,0108	X <sub>2</sub>	194,67	39,09	4,98	0,0042
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-8,25	5,78	-1,43	0,2126	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	13,68	60,16	0,23	0,8291
X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	4,03	4,60	0,88	0,4215	X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	184,50	47,88	3,85	0,0120

Por fim, na Tabela 20, referente ao polímero Não-iônico 3001-X, é possível observar que o termo quadrático X<sub>2</sub><sup>2</sup> e interação entre variáveis X<sub>1</sub>\*X<sub>2</sub> não apresentaram significância estatística abaixo de 0,100 (p-valor < 0,100) para a variável Turbidez. Já para o Tempo de desaguamento, os termos quadráticos X<sub>1</sub><sup>2</sup> e X<sub>2</sub><sup>2</sup> não foram estatisticamente significativos.

Na Tabela 21 abaixo é possível visualizar os resultados da matriz dos ensaios otimizados, com os valores reais (indicados entre parênteses) e os valores codificados, bem como os resultados das variáveis resposta, também conhecidas como variáveis dependentes para cada polímero ensaiado. Já na Tabela 22, é descrito a equação de regressão para cada polímero utilizado, os valores de F calculado e F tabelado, a porcentagem de variância explicada e o p-valor da equação de regressão.

Os resultados evidenciados nas Tabelas 21 e 22 abaixo mostram que o Polímero Não-iônico de baixa carga foi o mais indicado para o tratamento do lodo da ETA 006, tendo em vista que este polímero apresenta os melhores resultados, em termos de porcentagem da variância (R<sup>2</sup>), para tempo de desaguamento, turbidez do filtrado e vazão do filtrado. Além disso, é possível observar nos ensaios 9, 10 e 11 que o modelo apresentou uma boa repetibilidade, sem que

houvesse *ouliers*.

Tabela 21. Resumo das variáveis independentes, concentração de SST e dosagem do polímero, em valores codificados e reais (entre parêntese) e as respostas das variáveis dependentes turbidez e tempo para cada polímero.

Ensaio	Variáveis		Catiônico						Não-Iônico	
	Concentração De SST No Lodo	Dosagem Do Polímero	Chemifloc 9080-X		Chemifloc 9040-X		Chemifloc 9010-X		Chemifloc 3001-X	
			Turbidez (uT)	Tempo (s)	Turbidez (uT)	Tempo (s)	Turbidez (uT)	Tempo (s)	Turbidez (uT)	Tempo (s)
1	-1 (2.5)	-1 (1.5)	630	300	485	163	63.33	150	16.2	200
2	1 (18.5)	-1 (1.5)	2.54	420	35.97	345	15	325	30.4	240
3	-1 (2.5)	1 (6.0)	46.63	738	37.3	143	24.5	180	27.3	240
4	1 (18.5)	1 (6.0)	60.43	1835	60.6	864	42.5	1040	57.6	1018
5	-1 (2.5)	0 (3.75)	21.7	740	24.5	130	13.87	137	24.8	360
6	1 (18.5)	0 (3.75)	45.67	1037	53	742	22.2	528	52.3	593
7	0 (10.5)	-1 (1.5)	417.33	965	75.1	195	96.5	240	27	300
8	0 (10.5)	1 (6.0)	45.73	1224	75.8	415	56.8	650	77.9	650
9	0 (10.5)	0 (3.75)	31.9	375	49.7	315	44.2	270	57.8	360
10	0 (10.5)	0 (3.75)	39.07	762	59.6	374	47.07	505	64.3	505
11	0 (10.5)	0 (3.75)	35.48	994	39.8	410	41.43	300	68.6	300

Tabela 22: Porcentagem de variância explicada ( $R^2$ ), valor F calculado ( $F_{\text{calc.}}$ ) e F tabulado ( $F_{\text{tab.}}$ ) para as respostas de turbidez do filtrado e tempo de desaguamento, por análise de variância (ANOVA)

Turbidez do filtrado						
Polímeros		Equação de regressão	F <sub>calc</sub>	F <sub>tab</sub>	R <sup>2</sup> (%)	P-valor
Catiônico	9080-X	$Y_1 = 34.76 - 98.28 x_1 - 149.51 x_2 + 165.68 x_2^2 + 160.32 x_1 x_2$	12.8	4.534	89.50	0.00426
	9040-X	$Y_1 = 90.58 + 118.08 x_1 x_2$	4.3	5.117	32.10	0.06916
	9020-X	$Y_1 = 47.21 - 33.63 x_1^2 + 24.99 x_2^2 + 16.58 x_1 x_2$	8.9	4.347	79.18	0.00877
Não-iônico	3001-X	$Y_1 = 59.12 + 12 x_1 - 24.35 x_1^2 + 14.87 x_2$	13.5	4.347	85.22	0.00272
Tempo de desaguamento						
Polímeros		Equação de regressão	F <sub>calc</sub>	F <sub>tab</sub>	R <sup>2</sup> (%)	P-valor
Catiônico	9080-X	$Y_3 = 853.64 + 252.33 x_1 + 352 x_2$	5.6	4.459	58.49	0.02970
	9040-X	$Y_3 = 372.36 + 252.50 x_1 + 119.83 x_2 + 134.75 x_1 x_2$	40.8	4.347	94.60	0.00008
	9020-X	$Y_3 = 393.18 + 237.67 x_1 + 192.50 x_2 + 171.25 x_1 x_2$	27.0	4.347	92.05	0.00032
Não-iônico	3001-X	$Y_3 = 433.27 + 175.17 x_1 + 194.67 x_2 + 184.50 x_1 x_2$	27.0	4.347	92.05	0.00032

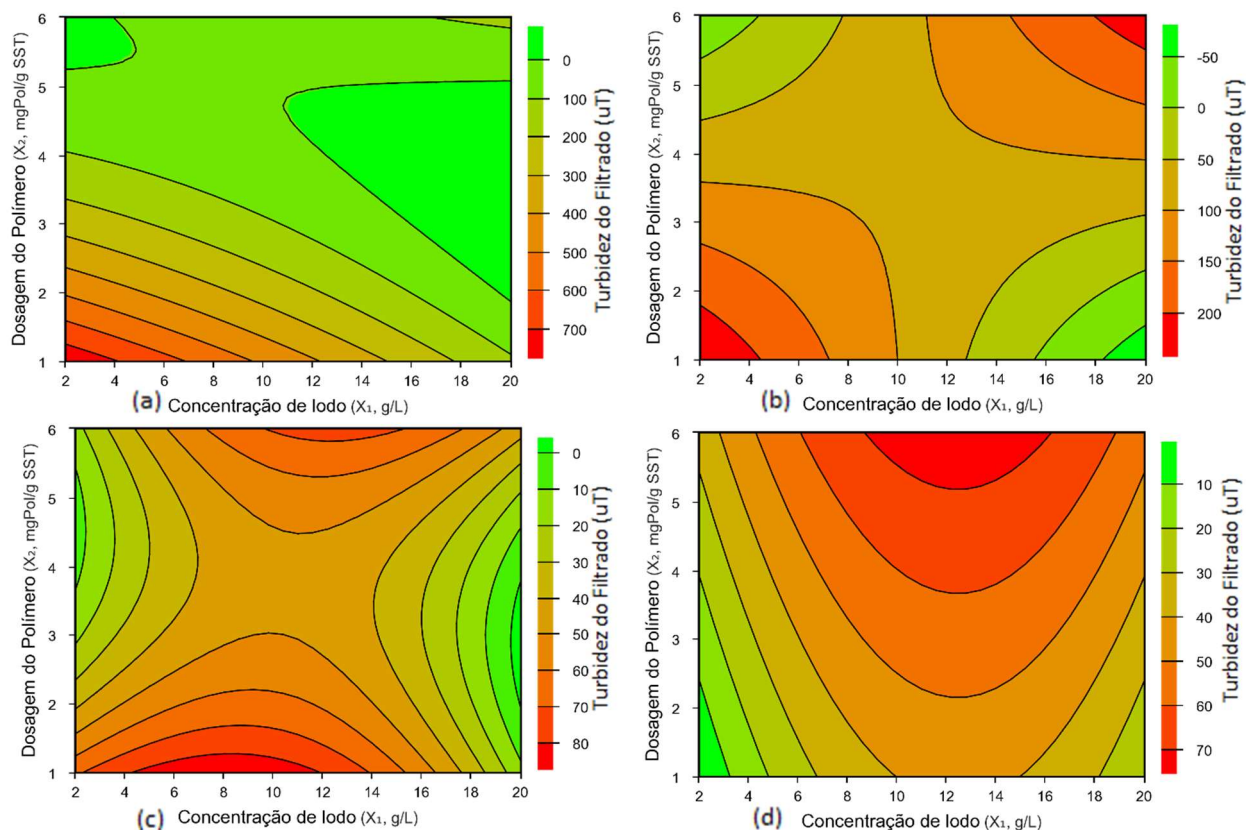


Figura 21. Curva de contorno da Turbidez do Filtrado: (a) Polímero Catiônico 9080-X, (b) Polímero Catiônico 9040-X, (c) Polímero Catiônico 9020-X, (d) Polímero Não-Iônico 3001-X.

É possível observar na Figura 21 (a) que o polímero catiônico 9080-X apresenta uma remoção de turbidez eficiente, chegando a valores mínimos de 2,54 uT e valores máximos de 417,33 uT para uma dosagem de 1,5 mgPol/gSST, indicando a ausência ou ineficiência do *filter cake* no filtro geotêxtil. Analisando a Figura 21 (a), fica destacado a influência da dosagem do polímero e da concentração do lodo, onde, a turbidez do clarificado tende a ser mais eficiente quanto maior for a concentração do lodo, ao passo que quanto maior a dosagem, melhor tende a ser os valores de turbidez. Entretanto, em concentrações elevadas de polímero com baixas concentrações de lodo, pior tende a ser a eficiência da turbidez do filtrado, em decorrência da maior viscosidade e opacidade do material filtrado.

O polímero catiônico 9040-X, visualizado na Figura 21 (b), não apresentou uma estatística significativa para o nível de significância de  $p\ value=0,05$ , possuindo seu valor de  $F_{calculado} > F_{tabelado}$ , tendo assim seus resultados compatíveis com a hipótese nula sugerida pelo teste da ANOVA.

O polímero catiônico 9020-X, visualizado na Figura 21 (c), apresentou melhores valores de turbidez próximos as extremidades de menor e maior concentração de lodo, para as melhores faixas de dosagem de polímero, sua correlação com a concentração se deu de maneira inversamente proporcional, onde, quanto menor a concentração de lodo, maior a dosagem necessária para uma elevada clarificação do lodo, e conseqüentemente, quanto maior a concentração do lodo, menor a dosagem necessária de polímero.



A Figura 21 (d) o polímero não-iônico 3001-X apresentou resultados de menor variabilidade de turbidez, com a menor turbidez do filtrado de 16,2 uT e a maior de 77,9 uT, para concentrações de polímero de 1,5 e 6,0 mgPol/gSST respectivamente. Ao analisar a Figura 21 (d), é possível observar que as menores faixas de turbidez do filtrado se dão em menores dosagens de polímero e em baixas ( $< 10$  g/L) ou altas ( $> 14$  g/L) concentrações de turbidez.

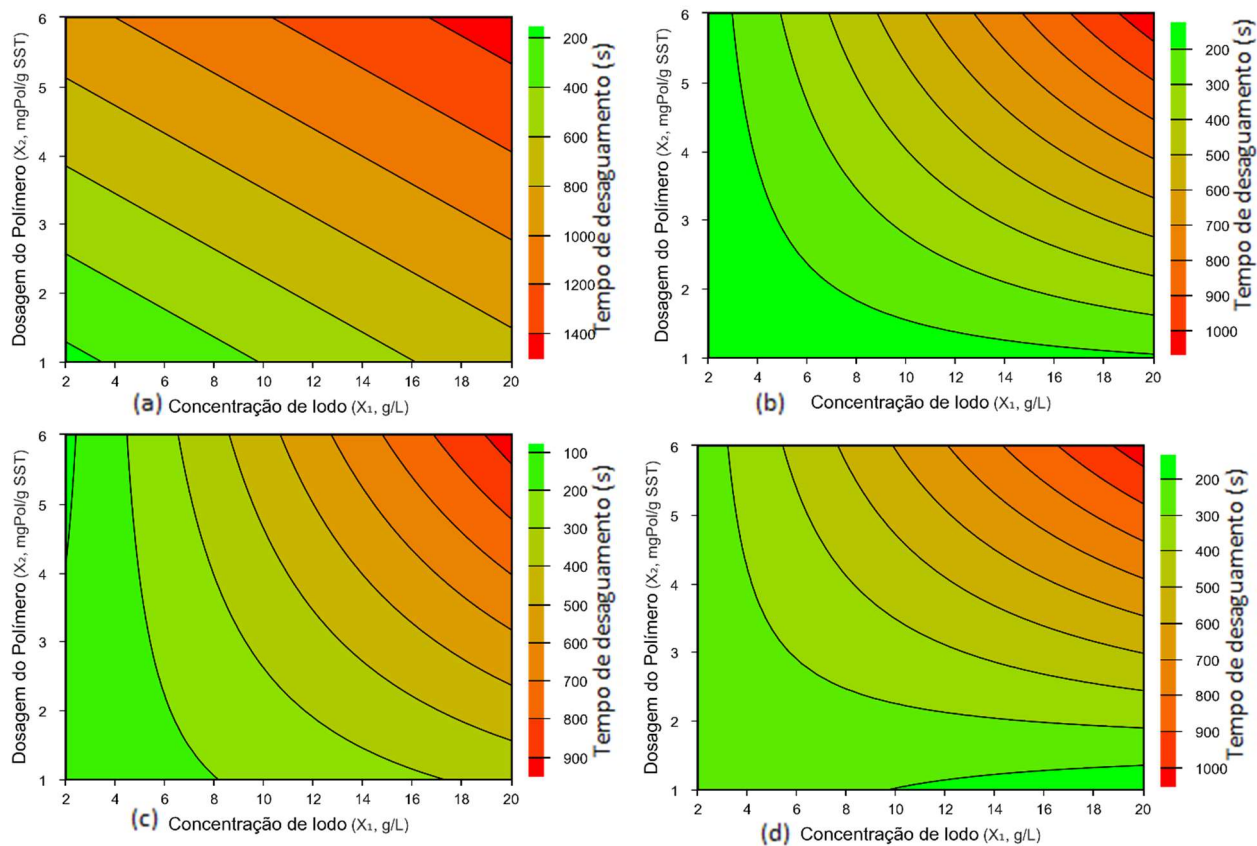


Figura 22. Curva de contorno do Tempo de Desaguamento: (a) Polímero Catiônico 9080-X, (b) Polímero Catiônico 9040-X, (c) Polímero Catiônico 9020-X, (d) Polímero Não-Iônico 3001-X.

## **5.2. Artigo 02: Avaliação do desaguamento do lodo de ETA obtido através da filtração pressurizada em tecido geotêxtil com aplicação da metodologia de superfície de resposta.**

### **Resumo**

A adoção de sistemas de desaguamento confinados em material geotêxtil tem se mostrado promissor na retenção de partículas sólidas provenientes do lodo de Estações de Tratamento de Água, em decorrência das suas elevadas propriedades hidráulicas e mecânicas. Entretanto, ainda existem poucos estudos que avaliam os efeitos provocados pelas alterações nas características físicas do lodo de ETA nos tubos em geotêxtil. Deste modo, o presente trabalho buscou avaliar, através do planejamento experimental, os efeitos da variação dos Sólidos Suspensos Totais (SST) e da dosagem de polímero em um sistema de ensaio de bancada com filtro pressurizado de geotêxtil juntamente com a aplicação de um polímero. O estudo foi dividido em duas etapas, a primeira destinada a coleta, preparo e caracterização do lodo da ETA, e a segunda etapa destinada a realização do planejamento experimental, do ensaio de bancada pressurizado e dos ensaios de teor de sólidos e umidade. Para o ensaio de bancada foi utilizado o lodo de ETA oriundo do tanque de equalização e preparadas três amostras nas concentrações de SST de 2,5 g/L, 10,5 g/L e 18,5 g/L. O polímero utilizado foi o polímero não-iônico 3001-X. Os resultados mostraram que os teores de sólidos suspensos totais (SST) do lodo e a dosagem do polímero exerceram influência na quantidade de lodo retido pelo tecido geotêxtil, na turbidez do filtrado, no tempo de desaguamento e na vazão do efluente. Para concentrações de SST abaixo de 6 g/L e acima de 16 g/L, com dosagem de polímero variando de 1,5 a 6,0 mgPol/gSST, os valores de turbidez do filtrado apresentaram os melhores resultados. Para os parâmetros de tempo de desaguamento e vazão, os resultados indicaram um aumento expressivo no tempo de desaguamento para concentrações de SST e dosagem do polímero elevadas. Já para a vazão, quanto maiores as concentrações de SST e a dosagem do polímero, menores foram os valores de vazão do filtrado. Por fim, para os parâmetros de teor de sólidos do lodo desaguado e umidade, quanto maiores as concentrações de SST do lodo, maiores foram as porcentagens de teor de sólidos e menores as porcentagens de umidade.

**Palavras-chave:** Polímero, desaguamento, lodo de ETA, planejamento experimental, tecido geotêxtil.

### **Abstract**

Adoptions of dewatering systems confined in geotextile material have shown promise in solid retention of particles from the sludge of Water Treatment Plants due to its high hydraulic and mechanical properties. However, there are still few studies that have sought to assess the effects

caused by changes in the physical characteristics of WTP sludge in geotextile tubes. Thus, the present work aimed to estimate, through experimental planning, the outcome of the variation of Total Suspended Solids (TSS) and polymer dosage in a bench top test system with a pressurized geotextile filter together with the application of a chemical conditioning agent. Divided into two stages, the first part of the study aimed at collecting, preparing and characterizing WTP sludge, and the second stage aimed at carrying out experimental planning, pressurized bench testing and solids and moisture tests. For the bench top test, the WTP sludge from the equalization tank and three samples were collected and prepared at SST concentrations of 2.5 g/L, 10,5 g/L and 18,5 g/L. The results showed that either the total suspended solids (TSS) of the sludge and the dosage of chemical conditioning influenced the amount of WTP sludge retained by the geotextile fabric, filtered turbidity, and dewatering time and effluent flow. To TSS concentrations below 6g/L and above 16g/L, with polymer dosage ranging from 1.5 to 6.0 mgPol/gTSS, the filtrate turbidity values showed the best results. To the parameters of dewatering time and flow, the results indicated a significant increase in dewatering time for TSS concentrations and high polymer dosage. To the flow rate, the higher the SST concentrations and the polymer dosage, the lower the filtered flow values. Finally, for the parameters of dewatered snit solids content and moisture, the higher the SST concentrations of the stake, the higher the percentages of solids content and the lower the moisture percentages.

**Key Words:** Chemical conditioning, dewatering, WTP sludge, experimental planning, geotextile fabric.

### **Introdução**

Atualmente, a crescente produção de lodo por estações de tratamento de água tem se tornado um desafio do ponto de vista econômico e ambiental para a engenharia. Em decorrência do seu elevado volume, presença de condicionantes químicos e sólidos em suspensão, o lodo oriundo de ETA representa um risco à qualidade de solos e mananciais, que são, no Brasil, os principais pontos de descarte desse material.

Devido as dificuldades logísticas e operacionais do lodo de ETA, estes materiais necessitam de métodos de desaguamento que visam desaguar o lodo e possibilitar um menor impacto ambiental quando descartados. A utilização de técnicas como os leitos de secagem e lagoas de lodo, embora de baixo custo, apresentam susceptibilidade quanto a intempéries, atrasando o processo de desaguamento e gerando problemas operacionais. Em contrapartida, técnicas como filtros prensa e centrífugas possuem alto custo energético, o que acaba onerando os custos de uma ETA.

O uso de condicionantes químicos no processo de desaguamento de lodo de ETA é um aspecto fundamental a ser considerado. A adição de polímeros como os catiônicos, não-iônicos e

aniônicos, promovem a aglutinação de partículas sólidas tal como os floculantes, e facilitam o processo de desaguamento pela retenção da fração sólida. (Mines Jr., 2014; Oliveira e Vidal, 2020, Ardila *et al.*, 2020).

A utilização de tubos em geotêxtil como uma alternativa técnica de desaguamento natural e de baixo custo energético tem sido fonte de diversos estudos com simulações tanto em escala de bancada quanto em escala-piloto. Confeccionados a partir de uma malha multifilamento de polipropileno flexível com pequenos orifícios, os tubos geotêxteis são responsáveis pela drenagem da fração líquida do lodo e retenção da fração sólida em seu tecido. Estudos recentes como os de Silva *et al.* (2020), Queiroz *et al.* (2020), Oliveira e Vidal (2020), Avancini *et al.* (2021), Berilgen e Bulut (2015) e Ardila *et al.* (2020) avaliaram diferentes aplicações de tubos geotêxteis, variando a gramatura do tecido geotêxtil, o tipo de polímero utilizado, o tipo de lodo a ser desaguado, a tipologia do ensaio (a gravidade ou pressurizado), e até a utilização de materiais que promovessem a retenção da fração sólidas nos estágios iniciais da filtração.

Responsáveis pela separação física entre a fração sólida e a fração líquida do lodo, a principal função do tubo geotêxtil é promover a redução volumétrica do material retido no interior do tubo, promovendo a sua estabilização e o posterior descarte em aterros, já para a fração líquida desaguada, este sistema possibilita o reaproveitamento do efluente que pode ser recirculado para o início do sistema de tratamento de água.

Devido à complexidade de fenômenos envolvidos no sistema de desaguamento por tubos geotêxteis e a sua contínua busca pela melhoria técnica, ainda existem pesquisas a serem desenvolvidas que busquem entender o mecanismo de funcionamento do geotêxtil e suas limitação. Sabe-se que fatores como a distribuição granulométrica dos grãos, a composição mineralógica e a concentração inicial de sólidos são fatores limitante da aplicabilidade da técnica de desaguamento por tubo geotêxtil. Deste modo, faz-se necessário o estudo com ensaios de bancada que busquem avaliar o lodo e tecido geotêxtil escolhido. Autores como Khanchan *et al.* (2014), Kanchan e Bhatia (2016) e Queiroz (2019), utilizando-se de métodos semelhantes, buscaram avaliar o desempenho do desaguamento do lodo de ETA por meio da filtração pressurizada utilizando diferentes polímeros, variando a gramatura dos tecidos geotêxteis e utilizando efluentes com diferentes características físico-químicas.

Portanto, o objetivo desse trabalho foi avaliar, através da ferramenta estatística de planejamento experimental, os efeitos das variáveis concentração de sólidos e a dosagem do polímero no processo de desaguamento do lodo de ETA a partir dos resultados das variáveis dependentes turbidez do filtrado, tempo de desaguamento, vazão de desaguamento, teor de sólidos retido e umidade.

## Materiais e Métodos

A pesquisa foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa foi realizado a coleta, preparo das soluções e caracterização do lodo. A segunda etapa consistiu na realização do planejamento experimental para o ensaio de bancada de desaguamento do lodo por filtro geotêxtil pressurizado, a execução do ensaio e avaliação dos resultados obtidos (ver Figura 23).

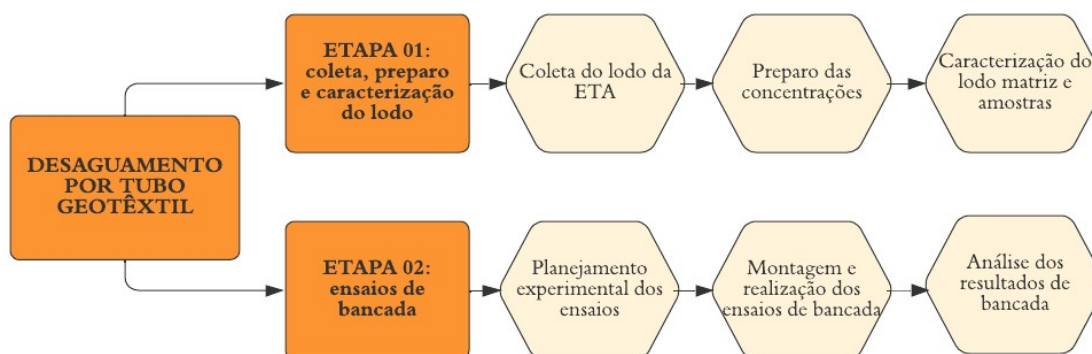


Figura 23. Fluxograma de procedimentos

Foi adotado a parametrização dos ensaios de caracterização do lodo conforme descritos no ALPHA (2017). É apresentado na Tabela 23 abaixo os ensaios físico-químicos adotados, suas respectivas unidades de medida, metodologia de ensaio e limites de detecção.

Tabela 23. Parâmetros, métodos e limites de medição

Parâmetro	Unidades	Método	Limite de detecção
Alumínio	mg/L Al	EAA-Forno de grafite	0.001
Alcalinidade	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Titrimétrico	1
Carbono orgânico total	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo	0.1
Carbono orgânico dissolvido	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo	0.1
Ferro	mg/L Fe	EAA - Chama	0.01
Manganês	mg/L Ma	EAA - Chama	0.001
pH	Adimensional	Potenciométrico	0.01
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1

O polímero utilizado para a realização do ensaio de desaguamento por filtro pressurizado com material geotêxtil foi o polímero não-iônico, de nome comercial CHEMIFLOC 3001-X da fabricante Mastryx. O polímero em questão, de estado físico granular branco, com alto peso molecular, sem carga e com densidade da massa de 720 kg/m<sup>3</sup>, foi escolhido por apresentar os melhores resultados no ensaio de bancada a gravidade com tubo geotêxtil para as variáveis de turbidez do filtrado e tempo de desaguamento, conforme indicado na pesquisa de Souza et al. (2022), que avaliou a influência de quatro condicionantes químicos no desaguamento do lodo de uma ETA localizada no Estado do Tocantins.

O geotêxtil utilizado para a realização do experimento em filtro pressurizado foi da fabricante Huesker e possui as propriedades conforme detalhada na Tabela 24 abaixo.

Tabela 24. Propriedades físicas do geotêxtil utilizado.

Propriedades	Geotêxtil 1 (GT1): PP 105/105 DW
Matéria-prima	Polipropileno
Massa por unidade de área (EN ISO 9864)	445 g/m <sup>2</sup>
Resistência a tração nominal (EN ISO 10.319)	≥ 105 kN/m
Deformação na Resistência Nominal (EN ISO 10.319)	≤ 9%
Permeabilidade (EN ISO 11.058)	25.10 <sup>-3</sup> m/s
Tamanho da abertura (NBR 12.956)	200 µm

Fonte: Huesker, (2021)

O lodo coletado da ETA foi disponibilizado pela companhia de saneamento do Estado do Tocantins. Por motivos de contrato, a companhia não permitiu a divulgação do seu nome e nem a divulgação do nome da ETA. A ETA em questão apresenta unidades de coagulação, floculação, decantação e filtração, caracterizando-a como uma ETA de ciclo completo e tem vazão média de 700 L/s. A coleta do lodo foi realizada no primeiro semestre do ano de 2022, onde foi retirada uma amostra do lodo presente no tanque de equalização da estação de tratamento em questão. A escolha do lodo de ETA contido no tanque de equalização se deu pela presença das características dos lodos oriundos das duas principais etapas de geração de lodo em uma estação de tratamento de água de ciclo completo, os decantadores e a água de lavagem dos filtros. A partir dessa coleta, foi obtido um “lodo matriz” (ver Figura 24) com volume suficiente para a realização dos ensaios de bancada em geotêxtil e os ensaios de caracterização físico-química do material.



Figura 24. Lodo matriz coletado e armazenado em barris.

A coleta do lodo no tanque de equalização se deu a partir do acesso à passarela e então realizada a descida de um balde coletor com o auxílio de uma corda e coletado o volume de lodo de aproximadamente 25 L, repetindo-se o procedimento até que se obtivesse um volume de lodo matriz aproximado de 1000 L. Após 24 horas em repouso, foi drenado parte do sobrenadante de modo que o “Lodo Matriz” obtivesse concentração de SST próximo de 35 g/L.

O ensaio de bancada foi realizado no Laboratório de Saneamento do IFTO, Palmas - TO, e as análises físico-químicas, realizadas no Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP, em Ribeirão Preto – SP. As análises seguiram a metodologia descrita em APHA (2017), conforme detalhada na Tabela 23.

A partir do “Lodo Matriz” foram preparadas três Concentrações de Lodo de Estudo (CLE),

a CLE 01 de 2,5 g/L, a CLE 02 de 10 g/L e a CLE 03 de 18,5 g/L. Após preparado, foi realizado o ensaio de Sólidos Suspensos Totais para conferir se as concentrações estavam dentro dos valores determinados (ver Figura 25).

Com o planejamento experimental, foi definido a metodologia conhecida como *Response Surface Methodology* (RSM), por meio do Delineamento de Face Centrada (DFC). Através da otimização dos resultados, o DFC buscou auxiliar na avaliação da influência dos parâmetros: dosagem do polímero e concentração inicial de SST no processo de desaguamento do lodo de ETA. Visando a validação estatística da pesquisa, foi utilizado software *Protimiza Experimental Design* (Rodrigues e Costa, 2014). Seus parâmetros de controle encontram-se apresentados na Tabela 25, conforme descrito por Rodrigues e Lemma (2014).



Figura 25. Coleta do Lodo Matriz e armazenamento (1), preparo das concentrações de lodo definidas

Tabela 25. Delineamento de Face Centrada para o ensaio de bancada pressurizado

Ensaio	Variáveis	
	X1 - SST inicial do lodo (g/L)	X2 - Dosagem de polímero (mgPol/gSST)
1	-1 (2,50)	-1 (1,50)
2	1 (18,50)	1 (6,00)
3	-1 (2,50)	-1 (1,50)
4	1 (18,50)	1 (6,00)
5	-1 (2,50)	-1 (1,50)
6	1 (18,50)	1 (6,00)
7	0 (10,50)	0 (3,75)
8	0 (10,50)	0 (3,75)
9	0 (10,50)	0 (3,75)
10	0 (10,50)	0 (3,75)
11	0 (10,50)	0 (3,75)

Além disso, o planejamento experimental auxiliou na escolha das seguintes variáveis resposta: Turbidez do filtrado, Tempo de desaguamento, Vazão de desaguamento, Teor de sólidos do material retido e a porcentagem de umidade no lodo retido no filtro geotêxtil.

Alguns autores como Khanchan *et al.* (2014), Kanchan e Bhatia (2016) e Queiroz (2019), utilizaram o filtro de bancada pressurizado em geotêxtil (FPG) para avaliação do desaguamento de lodo. O modelo adotado nessa pesquisa se baseou no estudo conduzido por Queiroz (2019). Para esse sistema de filtração, fez-se necessário a montagem do circuito em bancada com os

seguintes equipamentos: suporte de madeira, tecido geotêxtil do tipo GT1, compressor Schulz modelo CSA8,2, mangueira pneumática 6x4 mm, manômetro 10 kpa, funil e becker de vidro graduado. O sistema pressurizado consistiu em um tubo de acrílico de 76 mm de diâmetro por 500 mm de altura fechado com duas flanges e uma abertura roscável (ver Figura 26).

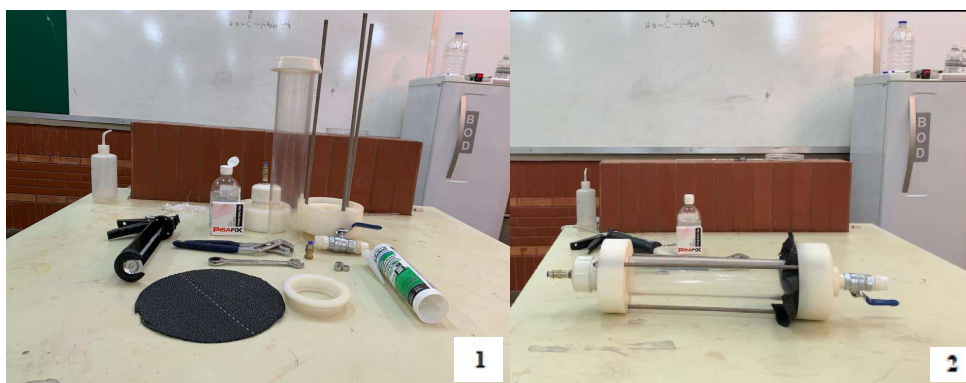


Figura 26. Equipamentos para filtração pressurizada em bancada: peças necessárias para a montagem do filtro (1); filtro pressurizado montado (2).

O ensaio do FPG seguiu a seguinte sequência de procedimentos (ver Figura 27):

- Homogeneização do lodo na concentração requerida, conforme planejamento experimental, e preparada uma alíquota de 500 ml de lodo no recipiente do *jar test*;
- Preparo do polímero conforme definido no planejamento experimental nas concentrações de 1,5 mgPol/gSST, 3,75 mgPol/gSST e 6 mgPol/gSST;
- Programação do *jar test* para a rotação de 192 rpm e tempo de 120 segundos;
- Aplicação das dosagens de polímero nas amostras de lodo e início da agitação no *jar test*;
- Após a mistura no *jar test* foi despejado a mistura de lodo com polímero no filtro pressurizado em geotêxtil e fechado de modo a evitar espaços para saída do ar confinado;
- Foi ajustado a pressão de 1,45 Psi com o auxílio de um manômetro e então aberto o registro de descarga para o início da filtração;
- Durante o desaguamento, foram coletados os volumes do material filtrado para cada 10 segundos de ensaio, finalizando o ensaio quando as gotas do filtrado eram inferiores a uma gota a cada 20 segundos;
- Por fim, foi realizado as análises dos parâmetros de turbidez do filtrado, tempo e vazão do filtrado, teor de sólidos e umidade no lodo retido pelo tecido geotêxtil.



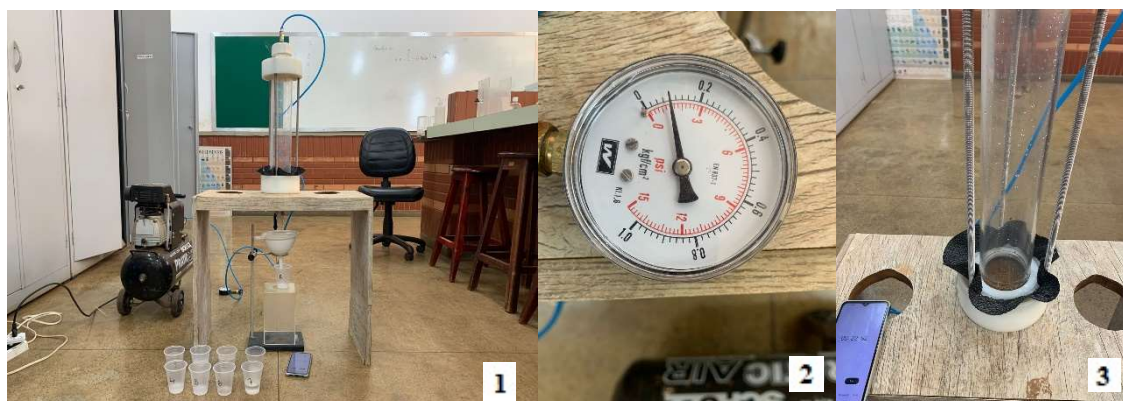


Figura 27. Ensaio com filtro pressurizado em geotêxtil: coleta do material filtrado durante o ensaio (1); Ajuste de pressão para 1,45 Kpi (2); Material sólido retido na membrana geotêxtil (3).

Para os ensaios de Teor de sólidos do lodo desaguado e umidade do lodo desaguado, estes seguiram a padronização prevista na NBR 6457/2016 – Amostras de solo. Segundo a NBR 6457, os ensaios de determinação do teor de sólidos e umidade devem seguir a sequência de procedimentos a seguir (ver Figura 28):

- Pesagem das cápsulas metálicas vazias e secas;
- Tomar uma quantidade de material e colocá-los nas cápsulas metálicas, de modo a não se perder a umidade do material sólido;
- Efetuar a pesagem do conjunto cápsula + solo úmido;
- Levar as cápsulas à estufa a uma temperatura de 105°C a 110°C em um intervalo de 16 h a 24 h;
- Após o intervalo de secagem, retirar as cápsulas da estufa e realizar a pesagem do material seco;
- Por fim, calcular o teor de sólidos e de umidade.

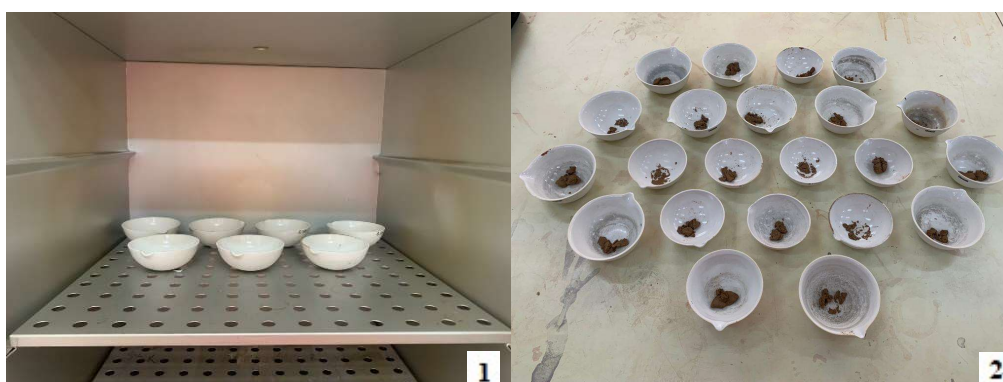


Figura 28. Ensaio de determinação do teor de sólidos e umidade: amostras úmidas dentro da estufa (1), amostras secas após secagem na estufa (2).

## Resultados e Discussões

A Tabela 26 abaixo traz os resultados das análises físico-químicas para o “Lodo Matriz” e as três amostras com concentrações de 2,50; 10,50 e 18,50 g/L, respectivamente. É possível observar a tendência de aumento nos parâmetros de pH, Carbono Orgânico Total (COT), Carbono Orgânico Dissolvido (COD), alcalinidade, manganês e turbidez conforme o aumento da concentração de SST nas amostras de lodo preparadas.

Tabela 26: Resultados da Caracterização físico-química dos resíduos de estudo

Parâmetro	Lodo Matriz	CRE 01 (2,50 g/L)	CRE 02 (10,00 g/L)	CRE 03 (18,50 g/L)
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	14	18	22	17
COD (mg/ L C)	8,442	8,474	8,982	7,821
COT (mg/ L C)	246	532	206	85
Manganês (mg/ L Mn)	29,36	4,43	3,15	0,94
pH	6,44	6,65	6,8	6,86
SST (mg/ L)	46782	8006	4263	2492
ST (mg/ L)	46910	8136	4730	2580
STD (mg/ L)	128	130	107	88
Ferro (mg/L Fe)	17964	2777	1627	1025
Alumínio (mg/L Al)	0,16	0,34	0,4	0,2

Visando a otimização do desaguamento do lodo da ETA em questão e a adequação do modelo matemático, foi utilizado o delineamento composto de face centrada (DCFC) em conjunto com a ANOVA. Neste modelo, foram consideradas duas variáveis, a primeira referente a concentração inicial de SST ( $X_1$ ) e a segunda referente a dosagem do polímero ( $X_2$ ). Com os resultados das variáveis  $X_1$  e  $X_2$ , foi possível realizar o cálculo dos coeficientes de regressão e a construção do modelo matemático para as variáveis dependentes: Turbidez do filtrado, Tempo de desaguamento, Vazão de desaguamento, Teor de sólidos do material retido e a porcentagem de umidade no lodo retido no filtro geotêxtil.

Adotando-se uma significância estatística de 90% de confiança ( $p\text{-value} \leq 0.10$ ), foram elaborados os modelos matemáticos que correlacionam as variáveis independentes  $X_1$  e  $X_2$  com as variáveis dependentes. Os coeficientes de regressão e desvios padrões das respostas observadas podem ser visualizadas nas Tabelas 27, 28 e 29 abaixo.

Tabela 27. Coeficiente de regressão e desvio padrão das variáveis Turbidez e Tempo de desaguamento.

Polímero Não-iônico - 3001-X									
Turbidez do Filtrado (uT)					Tempo de Desaguamento (s)				
	Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor		Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor
Média	58,83	3,46	16,99	0,0000	Média	647,16	144,90	4,47	0,0066
$X_1$	8,61	2,76	3,13	0,0261	$X_1$	429,17	115,31	3,72	0,0137
$X_1^2$	-35,47	4,24	-8,37	0,0004	$X_1^2$	495,61	177,46	2,79	0,0383
$X_2$	10,54	2,76	3,83	0,0123	$X_2$	343,67	115,31	2,98	0,0308
$X_2^2$	8,86	4,24	2,09	0,0910	$X_2^2$	72,11	177,46	0,41	0,7013
$X_1 * X_2$	2,54	3,37	0,75	0,4863	$X_1 * X_2$	59,25	141,23	0,42	0,6922

Na Tabela 27, referente às variáveis Turbidez e Tempo de desaguamento, é possível

observar que em ambas as variáveis, o valor da interação entre variáveis  $X_1 * X_2$  é superior ao limite de significância para p-valor (p-valor < 0,100). Para o tempo de desaguamento, a variável quadrática  $X_2^2$  não foi estatisticamente significativo.

Tabela 28. Coeficiente de regressão e desvio padrão das variáveis Vazão e Teor de sólidos.

Polímero Não-iônico - 3001-X									
Vazão (ml/s)					Teor de Sólidos (%)				
	Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor		Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor
Média	0,62	0,10	6,10	0,0017	Média	22,59	1,96	11,50	0,0001
$X_1$	-0,25	0,08	-3,16	0,0252	$X_1$	3,99	1,56	2,55	0,0511
$X_1^2$	-0,12	0,12	-1,00	0,3647	$X_1^2$	-4,69	2,41	-1,95	0,1087
$X_2$	-0,21	0,08	-2,68	0,0439	$X_2$	-0,19	1,56	-0,12	0,9090
$X_2^2$	0,14	0,12	1,15	0,3029	$X_2^2$	0,84	2,41	0,35	0,7400
$X_1 * X_2$	0,22	0,10	2,26	0,0731	$X_1 * X_2$	0,82	1,92	0,43	0,6872

Para a Tabela 28 acima, é possível observar que para o parâmetro Vazão, as variáveis quadráticas  $X_1^2$  e  $X_2^2$  não apresentaram significância estatística abaixo de 0,100. Já para o Teor de sólidos, as variáveis, média e a variável linear  $X_1$  foram as únicas que apresentaram significância estatística.

Tabela 29. Coeficiente de regressão e desvio padrão da variável Umidade.

Polímero Não-iônico - 3001-X				
Umidade (%)				
	Coef. de regressão	Erro padrão	T calculado	P-valor
Média	344,25	59,75	5,76	0,0022
$X_1$	-130,14	47,55	-2,74	0,0409
$X_1^2$	132,19	73,18	1,81	0,1307
$X_2$	20,21	47,55	0,42	0,6885
$X_2^2$	10,69	73,18	0,15	0,8896
$X_1 * X_2$	-47,74	58,24	-0,82	0,4497

É possível observar a partir da análise da Tabela 29 acima, apenas as variáveis, média e a variável linear  $X_1$  apresentaram significância estatística abaixo de 0,100.

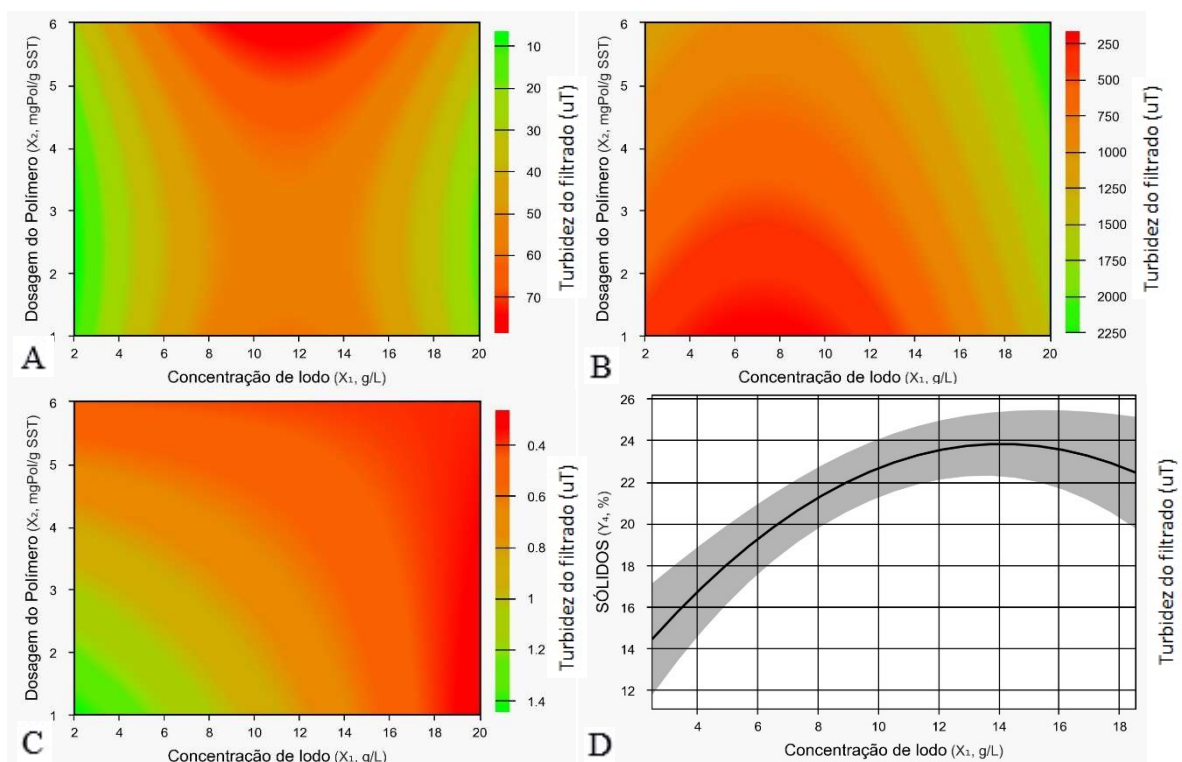
A Tabela 30 abaixo traz os resultados da matriz dos ensaios otimizados, com os valores reais (indicados entre parênteses) e os valores codificados, bem como os resultados das variáveis resposta, também conhecidas como variáveis dependentes. Já na Tabela 31, é descrito a equação de regressão, os valores de F calculado e F tabelado, a porcentagem de variância explicada e o p-valor da equação de regressão.

Tabela 30. Resumo das variáveis independentes, concentração de SST e dosagem do polímero, em valores codificados e reais (entre parêntese) e as respostas das variáveis dependentes.

Ensaio	VARIÁVEIS INDEPENDENTES		VARIÁVEIS DEPENDENTES				
	Concentração de SST no lodo	Dosagem do polímero	Turbidez (uT)	Tempo (s)	Vazão (ml/s)	Teor de sólidos (%)	Umidade (%)
1	-1 (2.5)	-1 (1.5)	15,17	330	1,48	14,15	85,85
2	1 (18.5)	-1 (1.5)	28,33	1170	0,41	23,30	76,70
3	-1 (2.5)	1 (6.0)	26,60	1225	0,40	11,50	88,50
4	1 (18.5)	1 (6.0)	49,90	2302	0,22	23,93	76,07
5	-1 (2.5)	0 (3.75)	20,20	730	0,64	17,75	82,25
6	1 (18.5)	0 (3.75)	35,40	1388	0,37	20,13	79,88
7	0 (10.5)	-1 (1.5)	57,00	618	0,78	24,03	75,97
8	0 (10.5)	1 (6.0)	87,25	653	0,76	24,92	75,08
9	0 (10.5)	0 (3.75)	54,07	647	0,68	24,28	75,72
10	0 (10.5)	0 (3.75)	52,77	715	0,48	16,63	83,37
11	0 (10.5)	0 (3.75)	60,77	747	0,66	24,77	75,23

Tabela 31. Porcentagem de variância explicada ( $R^2$ ), valor F calculado ( $F_{calc}$ ) e F tabulado ( $F_{tab}$ ) para as respostas das variáveis dependentes.

Filtro Pressurizado em Geotêxtil - Polímero não-iônico 3001-X					
Variáveis	Equação de regressão	$F_{calc}$	$F_{tab}$	$R^2$ (%)	P-valor
Turbidez do filtrado	$Y_1 = 58,83 + 8,61 x_1 - 35,47 x_1^2 + 10,54 x_2 + 8,86 x_2^2$	25,4	4,53	94,43	0,00066
Tempo de desaguamento	$Y_2 = 676 + 429,17 x_1 + 514,83 x_1^2 + 343,67 x_2$	13,9	4,35	85,62	0,00248
Vazão	$Y_3 = 0,63 - 0,25 x_1 - 0,21 x_2 + 0,22 x_1 x_2$	7,6	4,35	76,51	0,01323
Teor de sólidos	$Y_4 = 22,93 + 3,99 x_1 - 4,47 x_1^2$	7,7	4,46	65,78	0,01371
Umidade	$Y_5 = 348,53 - 130,14 x_1 + 135,04 x_1^2$	7,6	4,46	65,51	0,01416



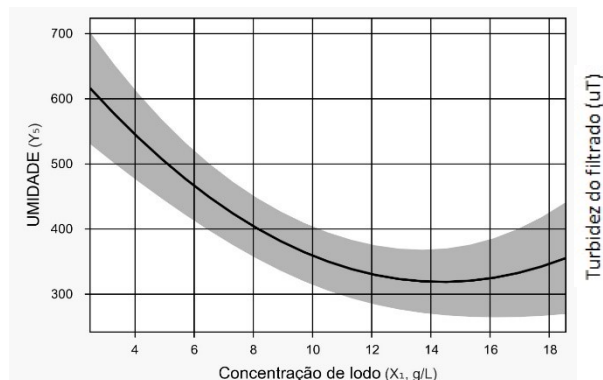


Figura 29. Curva de contorno da Turbidez do filtrado (A), Tempo de desaguamento (B), Vazão (C), Teor de sólidos do resíduo desaguado (D) e Umidade (E).

Os gráficos apresentados na Figura 29 acima trazem a superfície de resposta para a eficiência de filtração. Entende-se por índice de eficiência de filtração, o percentual relativo à retenção de partículas de Sólidos Suspensos Totais (SST) retidos no tubo geotêxtil, pelo valor de SST presente no efluente filtrado. A Figura 7A mostra que em concentrações de SST abaixo de 6 g/L e acima de 16 g/L, os valores de turbidez do filtrado tendem a ser melhores dentro de faixas de dosagem variando de 1,5 a 6,0 mgPol/gSST. Analisando as Figuras 29B e 29C, é possível visualizar uma relação entre tempo de desaguamento e a vazão do efluente filtrado, onde, quanto maior a dosagem do polímero e a concentração de SST do lodo, menor tende a ser a vazão do efluente, em decorrência de uma formação mais espessa do *filter cake* na base do tubo geotêxtil, dificultando a passagem da fração líquida presente no lodo, e o aumento da viscosidade do efluente líquido. Por fim, para as Figuras 29D e 29E, referentes às análises de teor de sólidos do resíduo desaguado e umidade, essas apresentaram uma relação inversamente proporcionais, onde, com o aumento da concentração de SST do lodo, maior foi o teor de sólidos retidos no tubo geotêxtil e conseqüentemente, menor foi a porcentagem de umidade contida nessas amostras.

## 6. CONCLUSÕES

No que diz respeito aos ensaios de bancada em geotêxtil, pode-se concluir:

- A filtração em material geotêxtil é uma tecnologia de desaguamento muito indicada para o desaguamento do lodo de ETA, em decorrência das suas propriedades físicas e hidráulicas, além do seu baixo custo operacional, quando comparadas à outras tecnologias de desaguamento;
- É possível identificar que a concentração inicial de SST, bem como a dosagem do polímero, polímero não-iônico, tiveram direta influência na retenção da fração sólida no tecido geotêxtil e no tempo de desaguamento do filtrado;
- A metodologia de superfície de resposta (RSM) se mostrou uma ferramenta eficiente no auxílio do planejamento experimental e da validação estatística dos resultados obtidos através dos ensaios de bancada;
- Os resultados do planejamento experimental demonstraram que tanto o polímero catiônico 9080-X, quanto o polímero não-iônico 3001-X obtiveram os melhores resultados para turbidez do filtrado, entretanto, no que diz respeito a combinação do tempo de desaguamento com turbidez do filtrado, apenas o polímero não-iônico apresentou resultados satisfatórios;
- A partir dos resultados obtidos, é possível observar a influência da dosagem do polímero em um sistema de desaguamento em geotêxtil através da aceleração da gravidade, onde elevadas concentrações podem prejudicar a turbidez do filtrado e ocasionar a colmatação prematura do tecido geotêxtil sem que haja um desaguamento eficiente.

Com relação aos ensaios em filtro pressurizado, pode-se concluir:

- A filtração pressurizada em geotêxtil (FPG) como ensaio de bancada para avaliação do desaguamento do lodo de ETA se mostrou um método eficiente na determinação de parâmetros que só poderiam ser visualizados em ensaios de escala-piloto;
- A escolha do polímero não-iônico 3001-X, se mostrou satisfatória para a análise de desaguamento por filtração pressurizada em geotêxtil, apresentando resultados estatisticamente confiáveis para as variáveis dependentes estudadas;
- A partir dos resultados obtidos, é possível observar a influência da dosagem do polímero em um sistema de desaguamento em geotêxtil, onde elevadas concentrações podem prejudicar a turbidez do filtrado, aumentar o tempo de desaguamento, reduzir a vazão de desaguamento e ocasionar a colmatação prematura do tecido geotêxtil sem que haja um efetivo desaguamento.
- Há de se ressaltar da necessidade de ensaios de tratabilidade do lodo de ETA antes da escolha e implantação do sistema de tratamento, pois cada lodo possui uma característica única, podendo levar a soluções específicas para cada tipo de lodo a ser desaguado.
- Os resultados obtidos através do ensaio de filtração pressurizada se mostraram eficientes com a

utilização do polímero não-iônico 3001-X, obtendo-se valores de turbidez dentro do preconizado pela portaria regulamentadora brasileira para águas de classe 2.

- Por fim, vale destacar a necessidade da realização de ensaios em escala-piloto para simularem as dosagens de polímero e as concentrações de SST mais próximas da realidade operacional de estações de tratamento de lodo.

## 7. REFERÊNCIAS

ACHON, CALI LAGUNA. **Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água à luz dos conceitos da ISO 14001. 2008.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ANDRADE, CYNTHIA FRANCO; SILVA, CRISTINA MENDES; OLIVEIRA, F. C. **Gestão ambiental em saneamento: uma revisão das alternativas para tratamento e disposição do lodo de eta e seus impactos na qualidade das águas.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL. 2014.

ANDREOLLI, C. V. (2001). **Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB). Resíduos Sólidos do Saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: Rima, ABES. 282 p

ARDILA, MARIA ALEJANDRA APARICIO, SAMIRA TESSAROLLI DE SOUZA, JEFFERSON LINS DA SILVA, CLEVER APARECIDO VALENTIN, AND ANGELA DI BERNARDO DANTAS. **"Geotextile Tube Dewatering Performance Assessment: An Experimental Study of Sludge Dewatering Generated at a Water Treatment Plant."** *Sustainability (Basel, Switzerland)* 12.19 (2020): 8129. Web.



AVANCINI, LIVIA LUIZA DE SOUZA, MATHEUS MULLER, AND DELMA DE MATTOS VIDAL. **"Application of Polyelectrolytes for Improving the Dewatering Performance of Drinking Water Treatment Sludge Using Geotextiles."** *Revista Ambiente & Água* 16.5 (2021): 1-14. Web.

BARROSO, MARCELO MELO. **Influência das micro e macropriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leito de drenagem.** 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BERILGEN, SAADET A., AND BEGÜM TURAN BULUT. **"Laboratory Investigations for Dewatering of Golden Horn Dredged Sludge with Geotextile Tubes."** *Marine Georesources & Geotechnology* 34.7 (2016): 638-47. Web.

CASTRO, N. **Sistemas tubulares para contenção de lodo e sedimentos contaminados.** 103f. 2005. Tese de Doutorado. Tese de mestrado–Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos.

CORNWELL, DAVID A.; MUTTER, RODNEY N.; VANDERMEYDEN, CAREL. **Commercial application and marketing of water plant residuals.** American Water Works Association, 2000.

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

DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D., VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** Editora LDiBe, São Carlos – SP, 2012. 540 p.

DRISCOLL, J., RUPAKHETI, P., BHATIA, S. K., KHACHAN, M. M. **Comparison of 1-D and 2-D tests in geotextile dewatering applications.** *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 2, n. 3,p. 1-9, 2016.

E SILVA, RODRIGO A, AND DELMA VIDAL. **"Uni and Bi-directional Dewatering Behaviour of Open Geotextile Containers Used for Filtration of Waste Slurries."** *Geotextiles and Geomembranes* 50.2 (2022): 347-56. Web.

FERNANDES, EDUARDO PAULY ET AL. **Análise comparativa de um novo conceito para unidades de desaguamento de lodo de estação de tratamento de água: estudo de caso de Olímpia-SP.** 2014.

FONTANA, ANTONIO OSMAR. **Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de lodo de decantadores e reuso de água de lavagem de filtros.** 2004.

GUIMARÃES, GUSTAVO COSTA. **Estudo do adensamento e desidratação dos resíduos gerados na ETA-Brasília.** 2007.

GUO, WEI; CHU, JIAN; NIE, WEN. **Analysis of geosynthetic tubes inflated by liquid and consolidated soil.** *Geotextiles and geomembranes*, v. 42, n. 4, p. 277-283, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2015). ***Geosynthetics – Part 1: Terms and definitions. ISSO 10318-1.*** Switzerland. 8 p.

JANUÁRIO, GLADYS FERNANDES; FERREIRA FILHO, SIDNEY SECKLER. **Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da Região Metropolitana de São Paulo.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 117-126, 2007.

LAWSON, C. R. **Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering.** *Geosynthetics International*, v. 15, n. 6, p. 384-427, 2008.

LOVO, ISADORA ALVES. **Avaliação do adensamento por gravidade e do desaguamento por centrifugação do lodo gerado pelo tratamento de água.** 2016.

MARTINS, P. M. **Utilização de tubos geotêxteis para o desaguamento de rejeitos de mineração.** São Paulo, v. 161, 2006.

MOO-YOUNG, HORACE K.; GAFFNEY, DOUGLAS A.; MO, XINGHUA. **Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile tubes.** *Geotextiles and Geomembranes*, v. 20, n. 5, p. 289-303, 2002.

MUTHUKUMARAN, A. E.; ILAMPARUTHI, K. **Laboratory studies on geotextile filters as**

**used in geotextile tube dewatering.** *Geotextiles and Geomembranes*, v. 24, n. 4, p. 210-219, 2006.

NIELSEN, STEEN. **Economic assessment of sludge handling and environmental impact of sludge treatment in a reed bed system.** *Water Science and Technology*, v. 71, n. 9, p. 1286-1292, 2015.

OLIVEIRA, GABRIEL LUIS ANIBAL DE, AND DELMA DE MATTOS VIDAL. **"Influence of Sand Addition in the Early Stage Retention of Fine Sludge Dewatering by Geotextile."** *Revista Ambiente & Água* 15.3 (2020): 1-12. Web.

ORNELAS FERREIRA, B.; ROCHA VIANNA, M. **Eficiência do desaguamento de lodos de decantadores e água de lavagem de filtros de estação de tratamento de água através de filtros geotêxteis: estudo de caso.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2013.

PALMEIRA, ENNIO MARQUES. **Fatores condicionantes do comportamento de filtros geotêxteis.** IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, v. 1, p. 49-67, 2003.

PIEPER, KARLA MARIA CYPRIANO. **Avaliação do uso de geossintético para o deságue e geocontenção de resíduos sólidos de estação de tratamento de água.** 2008.

QUEIROZ, SÉRGIO CARLOS BERNARDO. **Influência das características da água bruta no desaguamento de resíduos gerados no tratamento de água pela filtração em tubo geotêxtil.** 2019.

SCALIZE, PAULO SERGIO. **Disposição de resíduos gerados em estações de tratamento de água em estações de tratamento de esgoto.** São Carlos, SP, 2003.

SILVA, GIULLIANO GUIMARÃES. **Eficiência do desaguamento de resíduo de estação de tratamento de água em tubo geotêxtil.** Doutorado em Tecnologia Ambiental, 2019.

SILVA, G. G., DANTAS, A. D. B., QUEIROZ, S. C. B., RODRIGUES, M. I., & GUIMARÃES, M. A. R. **Uso da metodologia de superfície de resposta para avaliação do desaguamento de resíduos de estação de tratamento de água em filtração geotêxtil.** *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, v. 13, n. 3, p.939-956.

SILVA, LAIS CRISTINA FREITAS. **Utilização de tubos geotêxteis para confinamento, desaguamento e empilhamento de rejeito de ouro.** 2017.

TUNDISI, JOSÉ GALIZIA. **Governança da água. Revista da Universidade Federal de Minas Gerais**, v. 20, n. 2, p. 222-235, 2013.

URASHIMA, D.C. **Simulação do processo de retenção de partículas por filtros têxteis.** 100f. Tese (Doutorado) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2002.

VERTEMATTI, L.C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**, Edgard Blucher, 2ª edição, São Paulo, 2015.

VIDAL, D.; URASHIMA, D. C. **Dimensionamento de filtros e drenos em geossintéticos.** Geossintéticos, v. 99, p. 111-126, 1999.

WORLEY, J. W.; BASS, T. M.; VENDRELL, P. F. **Use of geotextile tubes with chemical amendments to dewater dairy lagoon solids.** Bioresource technology, v. 99, n. 10, p. 4451-4459, 2008.