



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

CAYO HENRIQUE ALVES NUNES

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE POLÍMEROS NO DESAGUAMENTO
DE LODO DE ETA UTILIZANDO TUBOS GEOTÊXTEIS**

PALMAS

2025

CAYO HENRIQUE ALVES NUNES

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE POLÍMEROS NO DESAGUAMENTO
DE LODO DE ETA UTILIZANDO TUBOS GEOTÊXTEIS**

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

Orientador: Dr. Giulliano Guimarães Silva

**PALMAS
2025**

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

- N972a Nunes, Cayo Henrique Alves
Avaliação da eficiência de polímeros no desaguamento de lodo de ETA utilizando tubos geotêxteis / Cayo Henrique Alves Nunes. – Palmas, TO, 2025.
57 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2025.
- Orientador: Giulliano Guimarães Silva
- I. Condicionantes químicos. 2. Desaguamento. 3. Lodo. I. Guimarães Silva, Giulliano. II. Título.

CDD 624

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

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

CAYO HENRIQUE ALVES NUNES

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE POLÍMEROS NO DESAGUAMENTO DE LODO DE ETA UTILIZANDO TUBOS GEOTÊXTEIS

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

Aprovado em: 06 / 02 / 2025

BANCA AVALIADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br GIULLIANO GUIMARAES SILVA
Data: 14/02/2025 15:55:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva, IFTO
Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br ALICE ROCHA DE SOUZA
Data: 14/02/2025 16:03:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Alice Rocha de Souza, IFTO

Documento assinado digitalmente
gov.br HUGO LOPES PEREIRA
Data: 14/02/2025 16:15:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Hugo Lopes Pereira, IFTO

Dedico este trabalho à minha vó, Eva Nunes, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos. Por tudo o que me ensinou. Por sempre me apoiar. A levarei sempre comigo na minha memória e coração.

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso é resultado de muito esforço e dedicação, e, por isso, sou grato à Deus por me dar forças para conseguir concluí-lo. Sem ele e sua misericórdia ao meu lado nos momentos difíceis eu jamais teria chegado até aqui.

Agradeço a minha família, especialmente meus pais, Deogenio e Zuleide, pelos conselhos, por toda dedicação, amor, renúncias e motivações investidos para que eu pudesse ter condições de lutar para realizar meus sonhos.

A minha irmã, Elayne, por me fazer buscar o meu melhor todos os dias.

Quero agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva, por sua paciência, orientações e conselhos cruciais empregados na realização deste trabalho.

Também quero agradecer ao IFTO e seus demais servidores pelo apoio.

Por fim, aos meus amigos que adquiri no decorrer deste curso, os quais compartilharam comigo vitórias e desafios, mas que com muita força de vontade e apoio mútuo me ajudaram a vencer.

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 condicionante químico 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 concentrações de polímero acima de 6 mgPol/gSST foi evidenciado um aumento na viscosidade 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-chave: Condicionantes químicos, Desaguamento, Lodo, 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: Chemical conditioning, Dewatering, Sludge, SST.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma de processos do tratamento da água bruta.....	16
Figura 2. Variação da concentração de SST durante o processo de lavagem dos filtros.....	19
Figura 3. Tecnologias mecanizadas de desaguamento de lodo de ETA.....	20
Figura 4. Tecnologias naturais de desaguamento de lodos.....	21
Figura 5. Classificação dos materiais geossintéticos.....	24
Figura 6. Estágios do desaguamento dos geotêxteis.....	26
Figura 7. Perda de partículas através da erosão interna.....	27
Figura 8. Formação do filter cake.....	28
Figura 9. Coleta e armazenamento do "lodo mãe": tanque de equalização (1), coleta e transporte do lodo em galões de 50 e 100 L (2), "lodo mãe" no laboratório de análise de águas (3).....	34
Figura 10. Lodos de ETA com concentrações definidas pelo planejamento experimental.....	34
Figura 11. Representação esquemática do planejamento experimental.....	36
Figura 12. 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).....	37
Figura 13. Ensaio de bancada: agitação do lodo com adição de polímero (1), equipamento de filtração em bancada durante o desaguamento do lodo floculado (2).....	38
Figura 14. Filtro pressurizado: peças necessárias para a montagem do filtro (1), filtro pressurizado montado (2).....	39
Figura 15. 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).....	40
Figura 16. 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.....	46
Figura 17. 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.....	47
Figura 18. Curva de contorno da Turbidez do filtrado (A), Tempo de desaguamento (B), Vazão (C), Teor de sólidos do resíduo desaguado (D) e Umidade (E).....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Vantagens e desvantagens dos processos mecanizados de desaguamento.....	20
Tabela 2. Vantagens e desvantagens dos processos naturais de desaguamento.....	22
Tabela 3. Funções dos diferentes tipos de geossintéticos.....	24
Tabela 4. Relação entre propriedades e funções dos geossintéticos	25
Tabela 5. Mecanismo de funcionamento dos principais condicionantes químicos.....	29
Tabela 6. Planejamento de pesquisa.....	31
Tabela 7. Relação dos equipamentos necessários.....	32
Tabela 8. Condicionantes químicos necessários.....	32
Tabela 9. Parâmetros e unidades de medida.....	33
Tabela 10. Condições experimentais das variáveis independentes.....	35
Tabela 11. Delineamento de Face Centrada para os ensaios de bancada em tecido geotêxtil.....	36
Tabela 12. Propriedades físicas dos geotêxtil ensaiado.....	37
Tabela 13: Resultados da Caracterização físico-química dos lodos de estudo.....	41
Tabela 14. Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9080-X.....	42
Tabela 15. Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9040-X.....	43
Tabela 16. Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9020-X.....	43
Tabela 17. Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero não-iônico 3001-X.....	44
Tabela 18. 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.....	45
Tabela 19: 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).....	45
Tabela 20: Resultados da Caracterização físico-química dos resíduos de estudo.....	48
Tabela 21. Coeficiente de regressão e desvio padrão das variáveis Turbidez e Tempo de desaguamento.....	49
Tabela 22. Coeficiente de regressão e desvio padrão das variáveis Vazão e Teor de sólidos.....	49
Tabela 23. Coeficiente de regressão e desvio padrão da variável Umidade.....	50

Tabela 24. Resumo das variáveis independentes, concentração de SST e dosagem do polímero, em valores codificados e reais (entre parênteses) e as respostas das variáveis dependentes.....	50
Tabela 25. Porcentagem de variância explicada (R^2), valor F calculado (F_{calc}) e F tabulado (F_{tab}) para as respostas das variáveis dependentes.....	51

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

COT	Cârbono Orgânico Total
COD	Carbano Orgânico Dissolvido
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	Geotextile Tube Dewatering Test
GTX-K	Geotextile Knitted
GTX-NW	Geotextile Non-Woven
GTX-W	Geotextile Woven
HBT	Hanging Bag Test
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
OPEX	Operation Expenditure
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SDU	Sistema de Drenagem Urbana
SES	Sistema de Esgoto Sanitário
SRSU	Sistema de Resíduos Sólidos Urbanos
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
STD	Sólidos Totais Dissolvidos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Problema de pesquisa.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo Geral.....	15
2.2	Objetivos Específicos.....	15
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1	Sistema de abastecimento de água.....	16
3.2	Origem dos lodos gerados no processo de tratamento de água.....	17
3.3	Tecnologias de tratamento dos lodos de ETA.....	18
3.3.1	Equalização dos lodos.....	19
3.3.2	Desaguamento do lodo de ETA.....	19
3.4	Geossintéticos.....	22
3.4.1	Propriedades dos materiais geossintéticos.....	24
3.5	Mecanismo de filtração em geotêxteis.....	25
3.6	Estudos sobre a eficiência de desaguamento por tubos geotêxteis.....	29
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	31
4.1	1º Etapa: Coleta e caracterização do lodo.....	33
4.2	2º Etapa: Planejamento experimental e ensaios de bancada.....	34
4.3	3º Etapa: Planejamento experimental e ensaios por filtração pressurizada.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1	Avaliação do desaguamento do lodo de eta obtido através da filtração por gravidade em tecido geotêxtil com aplicação da metodologia de superfície de resposta.....	41
5.2	Avaliação do desaguamento do lodo de eta obtido através da filtração pressurizada em tecido geotêxtil com aplicação da metodologia de superfície de resposta.....	44
6	CONCLUSÕES.....	53
	REFERÊNCIAS.....	55

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 patógenos 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) e condicionantes químicos 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.

1.1 Problema de Pesquisa

O processo de produção de água para abastecimento público possui uma elevada produção de resíduos devido a processos químicos, físicos e biológicos aplicados à água e que

objetivam torná-la potável, obedecendo as legislações existentes. A problemática relacionada aos resíduos provenientes de ETAs têm sido amplamente discutidos ao longo dos anos, pois a sua disposição in natura pode acarretar impactos ambientais severos (JANUÁRIO et al, 2007). Portanto, a problemática da pesquisa está relacionada ao alto teor de resíduos na água e os seus impactos aos consumidores finais e como foi possível encontrar a quantidade e o tipo adequado de polímero para alcançar os padrões de potabilidade exigidos em um sistema de tratamento de lodo por tubos geotêxteis.

Também será discutido como a dosagem de polímeros catiônicos e não-iônicos e a concentração de sólidos suspensos totais (SST) influenciam a eficiência do desaguamento do lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) em sistemas de bancada e escala-piloto utilizando tubos geotêxteis e qual o polímero e a dosagem ideal para otimizar o desaguamento do lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) em tubos geotêxteis, considerando a influência da concentração de sólidos suspensos totais (SST) e do condicionamento químico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência do desaguamento do lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) em tubos geotêxteis, determinando o polímero ótimo e sua dosagem ideal por meio de ensaios em bancada e escala-piloto, considerando a influência da concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST) e do condicionamento químico.

2.2 Objetivos Específicos

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

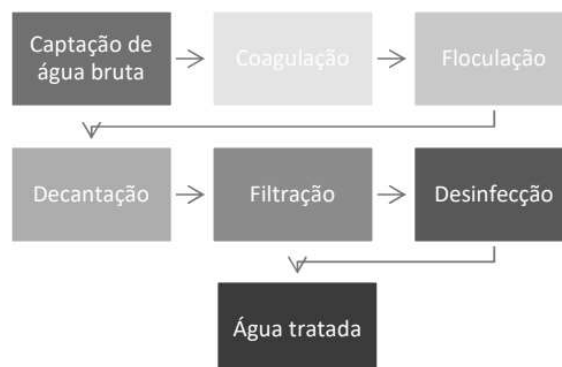
A Lei nº 11.445 de 05 de janeiro de 2007 delinea os quatro sistemas fundamentais do saneamento básico: Abastecimento de Água (SAA), Esgoto Sanitário (SES), Resíduos Sólidos Urbanos (SRSU) e Drenagem Urbana (SDU) (ACHON, 2008). Este estudo concentra-se no Sistema de Abastecimento de Água (SAA), que engloba a captação, adução, tratamento por meio de Estação de Tratamento de Água (ETA), armazenamento e distribuição aos consumidores finais.

As ETAs, projetadas para garantir água potável, são conjuntos de instalações e equipamentos destinados a processos e operações que envolvem a introdução de produtos químicos para alcançar a potabilidade (FERNANDES, 2014).

Água, essencial à vida humana, tem sido central na história da humanidade, e com ela surgem novos desafios para melhorar a qualidade de vida. As ETAs, portanto, representam uma resposta a esses desafios, removendo patógenos e elementos físico-químicos encontrados nas águas brutas de rios e lagos. O tratamento convencional, também conhecido como tecnologia de ciclo completo, é o método mais comum no Brasil, envolvendo processos sucessivos de remoção de impurezas (FERNANDES, 2014; TUNDISI, 2013).

Dentro do contexto das ETAs de ciclo completo, a água bruta passa por uma série de etapas até atender aos padrões de potabilidade. Essas etapas incluem coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção de pH, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1. Fluxograma de processos do tratamento da água bruta



Fonte: adaptado de Moreira (2017).

No contexto de um sistema de tratamento de água convencional, o processo de coagulação envolve a desestabilização das partículas coloidais por meio da reação química do coagulante com a água, seguida de uma rápida mistura. Após a coagulação, ocorre o processo de floculação, no qual as partículas coloidais aumentam de tamanho através de colisões promovidas pelo processo físico. Em seguida, as partículas coloidais floculadas decantam por meio da decantação gravitacional, resultando na clarificação da fase líquida (FERNANDES, 2014).

Segundo Fernandes (2014), a etapa seguinte à decantação é a filtração, que separa a fase sólida da líquida, abrangendo fenômenos físicos, químicos e até biológicos. Os filtros, geralmente compostos por camadas de areia e antracito, retêm as impurezas da água decantada, formando o lodo de ETA, que posteriormente é lavado e direcionado ao tanque de equalização.

Além disso, as ETAs incluem os processos de desinfecção e fluoretação. A desinfecção tem como objetivo remover microrganismos patogênicos através da aplicação de oxidantes e desinfetantes como o cloro. No entanto, de acordo com Di Bernardo (2014), os processos de desinfecção, especialmente a pré-oxidação e adsorção, têm um impacto direto no volume do lodo gerado. A fluoretação é uma etapa essencial para promover a saúde bucal da população, utilizando ácido fluossilícico e fluossilicato de sódio.

3.2 Origem dos lodos gerados no processo de tratamento de água

O aumento considerável na geração de lodo proveniente das Estações de Tratamento de Água (ETAs) tem se tornado uma preocupação tanto em níveis nacional quanto global. O crescimento industrial ao longo dos anos tem aumentado a demanda por água potável, resultando em um significativo aumento no número de ETAs e, conseqüentemente, um aumento nos impactos ambientais nos rios e solos, que são frequentemente utilizados para o descarte de lodo sem tratamento. Como consequência da disposição inadequada desses lodos, tanto os solos quanto os corpos d'água tendem a se tornar inadequados para outras atividades (MUTHUKUMARAN e ILAMPARUTHI, 2006).

Em um sistema convencional de tratamento de água, o lodo é gerado em quatro etapas principais, resultando da limpeza dos decantadores, da lavagem dos filtros, dos floculadores e dos tanques de preparação de produtos químicos. Os processos de produção de lodo considerados mais representativos em termos de massa e volume são os lodos provenientes da água de lavagem dos filtros e dos separadores de fase sólido-líquido (SCALIZE, 2003; DI BERNARDO e SABOGAL, 2008). Segundo Richter (2001), a maior parte da massa total de lodo em base seca gerada por um sistema de tratamento de água convencional provém dos

tanques de decantação, representando cerca de 60 a 95% do total, enquanto o restante vem da água de lavagem dos filtros.

Entretanto, de acordo com Di Bernardo et al. (2017), vários fatores quantitativos e qualitativos podem influenciar diretamente no volume de lodo gerado por esses dois principais mecanismos de produção de lodo. Isso inclui a qualidade da água bruta, a tecnologia de tratamento adotada, a dosagem de coagulantes químicos, o uso de processos de pré-oxidação, a automação de processos e até mesmo a experiência dos operadores.

3.3 Tecnologias de tratamento dos lodos de ETA

Ao longo dos anos, têm surgido diversas tecnologias para o tratamento de lodo proveniente das Estações de Tratamento de Água (ETAs). Essas tecnologias consideram uma variedade de fatores, como condições climáticas, disponibilidade de espaço, concentração e volume dos lodos gerados, disponibilidade de mão de obra local, consumo energético e outros. Portanto, é crucial ter um entendimento das características do lodo gerado para selecionar a tecnologia mais apropriada para cada situação. A caracterização do lodo de ETA deve incluir parâmetros como sólidos (totais, suspensos e dissolvidos), turbidez, pH, carbono orgânico total (COT), entre outros (GUIMARÃES, 2007).

Como destacado por Di Bernardo et al. (2012), antes de escolher o método de tratamento dos lodos, é essencial realizar um diagnóstico do funcionamento da ETA específica para identificar as características operacionais necessárias para dimensionar adequadamente o sistema de tratamento de lodos.

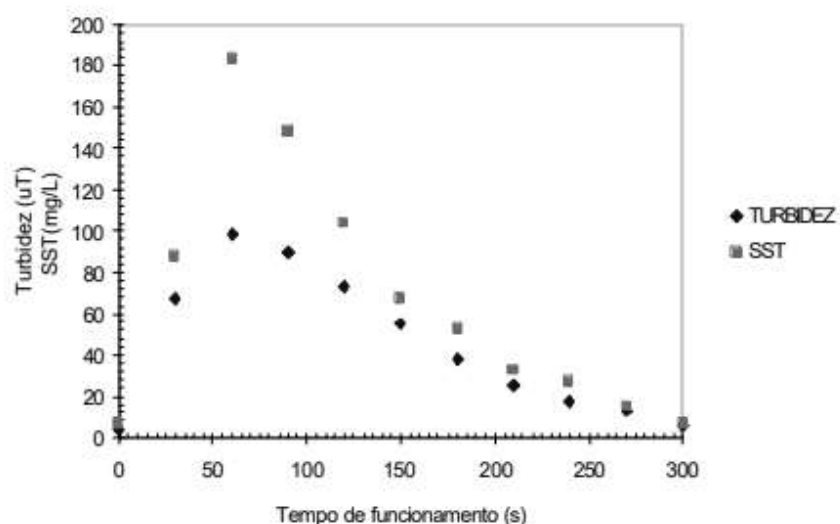
No que diz respeito aos filtros, é importante considerar o tipo de meio filtrante, taxa de filtração, método de controle, tipo de lavagem, frequência e duração da lavagem, vazão utilizada, expansão do meio filtrante, volume de água usado em cada lavagem, coleta de amostras da água de lavagem de pelo menos dois filtros durante o período de lavagem, preparação de uma amostra composta e medição de suas características (SST, DQO, DBO5, etc.).

Para os decantadores, é relevante considerar características como 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 e 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, DBO5, etc.).

3.3.1 Equalização dos lodos

O processo de equalização dos lodos tem como objetivo alcançar uma homogeneidade no lodo, já que as concentrações de Sólidos Suspensos Totais (SST) provenientes da lavagem dos filtros e da descarga dos decantadores em Estações de Tratamento de Água (ETAs) apresentam valores distintos, o que afeta diretamente o custo final do produto desaguado. Esse fenômeno é evidente, por exemplo, na lavagem dos filtros, onde ao longo do tempo, as concentrações de turbidez e SST tendem a diminuir, alterando as concentrações de sólidos à medida que o material é recirculado para o início da ETA ou para os sistemas de tratamento de lodo propriamente ditos (SCALIZE, 2003), conforme ilustrado na Figura 2.

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

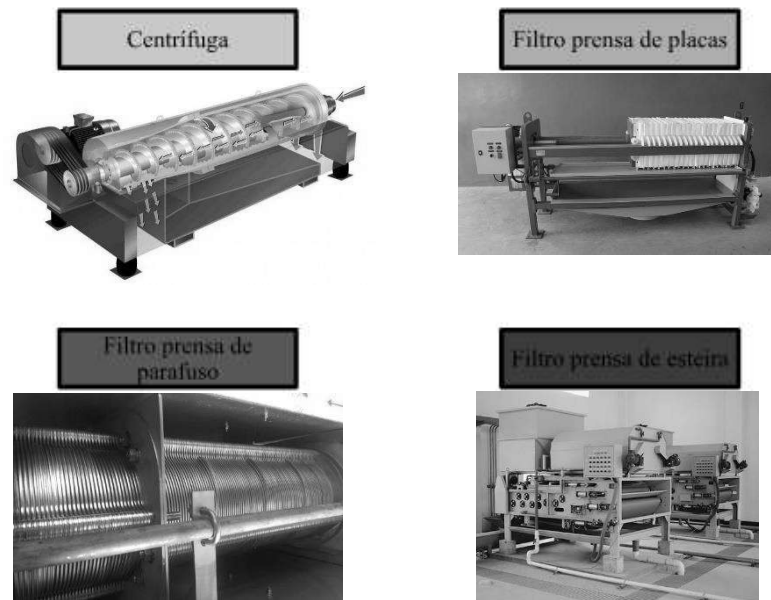


Fonte: Scalize (2003)

3.3.2 Desaguamento de lodo de ETA

Devido ao grande volume da fase líquida em comparação com a fase sólida dos lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs), surgem métodos e técnicas para desaguar o lodo. O desaguamento, também conhecido como desidratação, refere-se ao processo de separação da fase sólido-líquida ou, conforme explicado por Di Bernardo et al. (2012), ao aumento do teor de Sólidos Suspensos Totais (SST) e à redução volumétrica do lodo a ser disposto. Esse processo pode ser realizado por meio de sistemas mecanizados ou naturais. As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, alguns exemplos de sistemas mecanizados e naturais de desaguamento de lodo provenientes de ETAs.

Figura 3. Tecnologias mecanizadas de desaguamento de lodo de ETA



Fonte: autor (2024)

Em geral, processos mecânicos de desaguamento são mais indicados para estações de tratamento com restrição de espaço e que buscam uma alta compactação da massa de lodo sólido. Dentre os equipamentos disponíveis no mercado, destacam-se as prensas desidratadoras, centrífugas, filtros prensa e filtros rotativos (RICHTER, 2001; SCALIZE, 2003). A Tabela 1 apresenta uma lista das vantagens e desvantagens dos processos mecânicos de desaguamento de lodo proveniente de ETAs.

Tabela 1. Vantagens e desvantagens dos processos mecanizados de desaguamento

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

Fonte: adaptado de Di Bernardo e Dantas (2005)

Conforme discutido por Di Bernardo et al. (2012, 2017), em relação às tecnologias mecanizadas de desaguamento, destacam-se as seguintes:

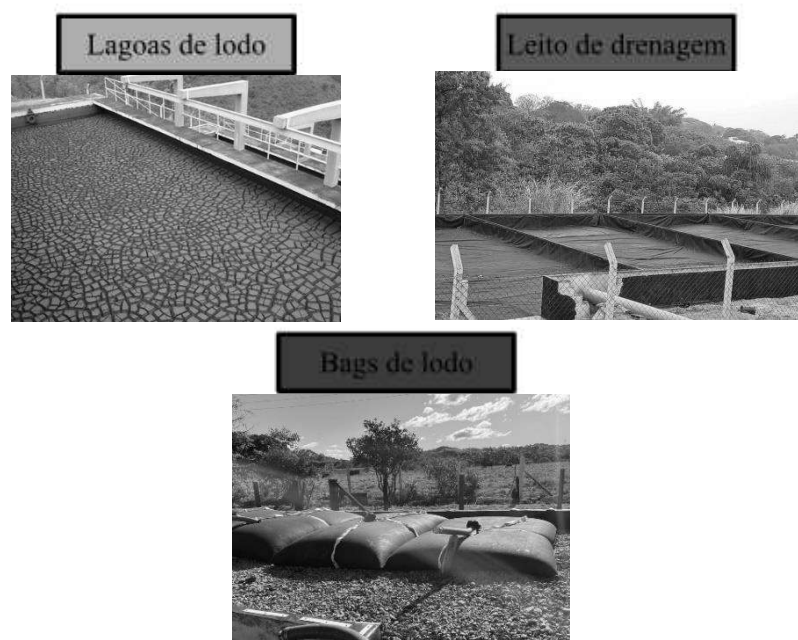
Centrífugas: Este equipamento é equipado com um tanque de armazenamento e um misturador submersível ou um agitador tipo turbina. À medida que o lodo entra na câmara da centrífuga por meio de bombas, uma solução de polímero é adicionada para auxiliar na formação de partículas coloidais de maior tamanho, facilitando o processo de desaguamento.

Filtro prensa de esteira: Neste método, o lodo a ser desaguado entra em uma câmara onde uma solução de polímero é adicionada. Em seguida, usando uma esteira porosa, ocorre a separação da fase sólido-líquida do lodo. Finalmente, a fase sólida passa por uma série de rolos de tração até se tornar um produto desidratado.

Filtro prensa de placas: Existem dois tipos de filtros prensa de placas: o tipo membrana (FPPM) e o tipo câmara (FPPC). Neste processo de desaguamento, o lodo é bombeado e uma solução de polímero é aplicada. Em seguida, por meio de fluido hidráulico, as membranas são pressurizadas sobre o lodo, resultando na saída da fase líquida e na formação da torta desaguada.

Prensa desaguadora tipo parafuso: Nesta tecnologia, o lodo é concentrado em um tanque de homogeneização e uma solução polimérica é aplicada para auxiliar na floculação das partículas sólidas. Posteriormente, o lodo entra em um equipamento com formato de parafuso, onde ocorrem os processos de concentração, filtração e prensagem. Após este processo, a torta de lodo formada é separada e encaminhada para um destino apropriado.

Figura 4. Tecnologias naturais de desaguamento de lodos



Fonte: autor (2024)

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

Fonte: adaptado de Di Bernardo e Dantas (2005)

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

Lagoas: Esta abordagem de baixo custo é especialmente adequada para Estações de Tratamento de Água (ETAs) de pequeno porte. Consiste na criação de lagoas de baixa profundidade, com uma lâmina líquida máxima de 2,00 m, e de grandes comprimentos. Os taludes das lagoas devem ser revestidos para evitar a erosão e a contaminação do solo. Com a exposição direta do lodo à luz solar, ocorre a evaporação da água, deixando para trás as tortas de lodo.

Filtração em leito de secagem e leito de drenagem: O desaguamento é realizado através da evaporação e da drenagem por meio de camadas porosas. No leito de secagem, há duas camadas principais: uma de pedregulho, que suporta a camada superior e facilita a percolação do líquido drenado, e uma camada de areia grossa, que permite a percolação da fase líquida.

Filtração em geotêxtil: Nesta técnica, a fase líquida é separada da fase sólida pela drenagem do líquido através dos poros do geotêxtil, resultando no desaguamento gradual do lodo e na sua redução volumétrica subsequente.

3.4 Geossintéticos

A conceituação dos geossintéticos foi oficializada por Jean Pierre Giroud na Conferência Internacional sobre o Uso de Tecidos em Geotécnica. Esses materiais são

caracterizados por sua versatilidade em diversas aplicações geotécnicas, desempenhando funções variadas (primárias ou secundárias) em obras de engenharia. Compostos por fibras ou filamentos têxteis ordenados ou dispostos aleatoriamente, podem servir como reforço, 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) delineiam os principais marcos do desenvolvimento dos geossintéticos ao longo do tempo:

As primeiras aplicações ocorreram em 1926, quando o departamento de estradas da Carolina do Sul utilizou-os para reforçar vias. No final dos anos 1950, foram produzidas mantas sintéticas para proteger obras costeiras na Holanda, após desastres naturais.

Nos anos 1950, nos EUA, mantas geossintéticas foram usadas como filtros granulares. Na década de 1960, começou-se a empregar material polimérico como reforço para aterros sobre solos moles e estradas na França. Porém, somente na década de 1970 houve uma aceleração e padronização do uso em obras geotécnicas, com a aplicação em barragens e muros de contenção.

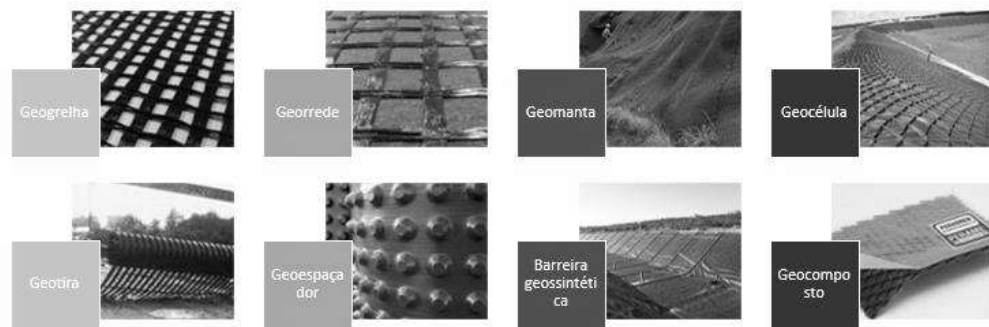
A partir dos anos 1990, normas relacionadas foram publicadas por organizações como a ASTM e a ISO.

Segundo a ABNT NBR ISO 10.318 Geossintéticos – Parte 1: Termos e definições (2018), os geossintéticos são classificados em três grupos principais: tecidos (GTX-W), não-tecidos (GTX-NW) e tricotados (GTX-K).

- Geotêxtil tecido (GTX-W): entrelaçamento em ângulos retos, com dois ou mais conjuntos de fios.
- Geotêxtil não-tecido (GTX-NW): fibras, filamentos ou outros elementos orientados de forma direcional ou aleatória.
- Geotêxtil tricotado (GTX-K): entrelaçamento de fios, filamentos ou outros elementos.

Os geossintéticos são classificados, segundo a ISO 10.318 (2018), em geogrelhas, georredes, geomantas, geocélulas, geotiras, geoespaçadores, barreiras geossintéticas (poliméricas, argilosas ou betuminosas) e geocompostos. Suas características podem ser visualizadas na Figura 5, enquanto a Tabela 3 mostra a aplicabilidade de cada tipo.

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			
Georede	X						
Geomanta						X	X
Geocélula				X		X	
Geotira				X			
Geoespaçador	X						
Geossintética			X		X		X
Geocomposto	X			X			X

Fonte: adaptado de Vertematti (2015)

3.4.1 Propriedades dos materiais geossintéticos

Os materiais geossintéticos exibem diversas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas que variam de acordo com as funções que devem desempenhar. Portanto, compreender e analisar suas propriedades é fundamental para uma aplicação correta, considerando as condições específicas de uso (URASHIMA, 2002).

Silva (2017) destaca que as propriedades físicas dos geossintéticos incluem a gramatura, espessura, porosidade, forma, abertura de filtração e arranjo estrutural dos fios, bem como a distribuição dos poros. Munoz (2005) descreve as características mecânicas dos materiais geossintéticos, tais como compressibilidade, resistência à tração não confinada, resistência à penetração por punção e resistência à perfuração dinâmica. Silva (2017) também aborda as condições críticas dos tubos geossintéticos durante o enchimento, destacando que as tensões axiais e de tração podem atingir o limite de serviço suportado pelo material polimérico.

No que diz respeito às propriedades hidráulicas, características como condutividade hidráulica, abertura de filtração, transmissividade e permissividade são relevantes. Segundo Silva (2017), os sistemas de filtros com geotêxteis são dimensionados considerando critérios de retenção da fração sólida e permeabilidade da fração líquida. Nos tubos geotêxteis, o escoamento do fluido ocorre através dos tecidos, com a parte líquida sendo expelida para o exterior e a fração sólida sendo retida no interior dos tubos.

A Tabela 4 apresenta a relação entre as propriedades dos materiais geossintéticos e suas respectivas funções, onde são indicadas a significância de cada propriedade: 1 para baixa, 2 para média e 3 para alta.

Tabela 4. Relação entre propriedades e funções dos geossintéticos

Propriedades	Funções					
	Drenagem	Filtragem	Separação	Reforço	Proteção	Barreira de fluidos
Espessura	3	1	-	-	3	2
Compressibilidade	3	2	-	-	1	
Resistência a tração	-	-	1	3	1	1
Modulo 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	-
Transmisividade	3	1	-	-	-	-
Distribuição de poros	2	3	2	-	-	-
Permissividade	1	3	2	-	-	-

Fonte: adaptado de Lopes (1998)

No entanto, é importante destacar que essas propriedades dos materiais geotêxteis não consideram fatores externos, como as condições de campo, que podem impactar diretamente tanto na execução da obra quanto em sua durabilidade (MUNOZ, 2005).

3.5 Mecanismo de filtração em geotêxteis

A ampla adoção de filtros geotêxteis como substitutos de materiais naturais em sistemas de drenagem tem sido amplamente aceita no mercado devido à sua viabilidade técnica, ambiental e econômica, em comparação com os sistemas naturais. Para isso, a aplicação dos geotêxteis, tanto tecidos quanto não-tecidos, em sistemas de filtração deve garantir que o fluxo

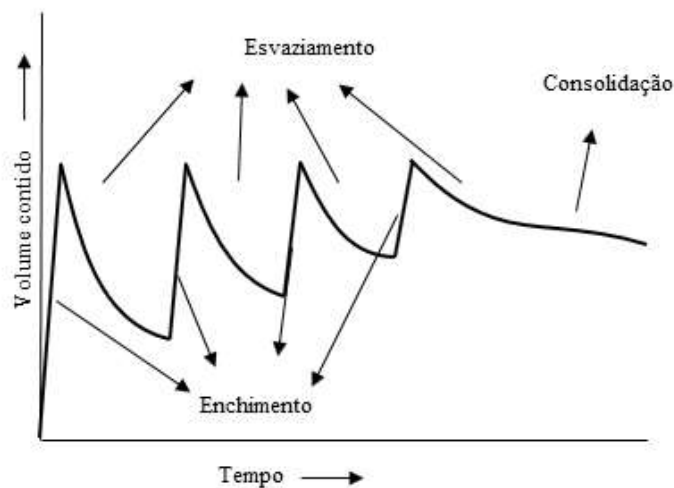
de água não seja obstruído pela membrana polimérica, ao mesmo tempo em que retém as partículas sólidas (MUNOZ, 2005; SILVA, 2018).

A utilização de sistemas confinados para desaguamento dos lodos provenientes de estações de tratamento de água teve suas primeiras aplicações no início da década de 1990. Segundo Silva (2018), o processo envolve o bombeamento de um grande volume de água contendo partículas sólidas para áreas confinadas, visando reduzir o volume de água no lodo.

O desaguamento com tubos e bolsas em geotêxtil compreende três estágios principais. O primeiro é o estágio de enchimento, no qual o lodo é bombeado para dentro do tubo ou bolsa em geotêxtil com o auxílio de uma bomba. O segundo estágio, chamado de desaguamento ou rebaixamento, ocorre quando o material confinado pela membrana polimérica força a saída da água através do tecido permeável, retendo as partículas sólidas. Durante essa etapa, ocorre uma significativa redução volumétrica devido à saída da água.

Por fim, o terceiro estágio é a fase de consolidação, na qual 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.

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 distintas. Na parte superior, conhecida como zona de suspensão, há a presença de sólidos em suspensão no meio líquido. No meio do tubo está a zona de sedimentação, onde ocorre o movimento descendente dos sedimentos anteriormente em suspensão. Logo abaixo está a zona sedimentada, onde os sólidos se depositam no fundo da bolsa.

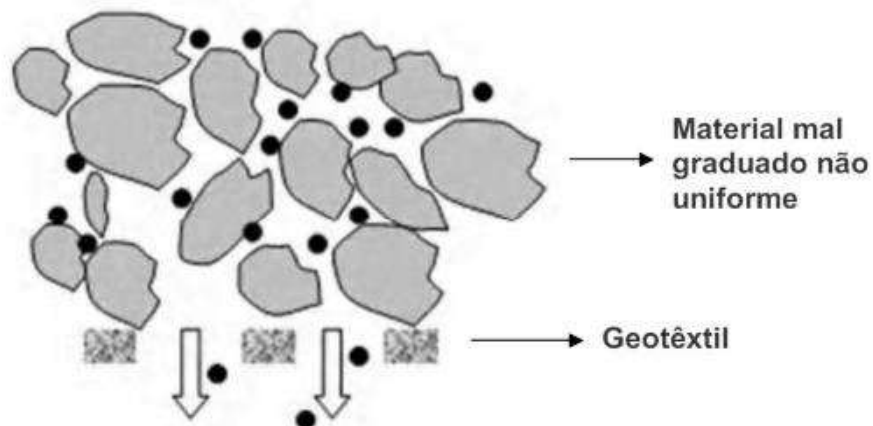
Urashima (2002), Munoz (2005), Silva (2017) e Silva (2019) destacam a importância de considerar fatores relacionados às características de filtração, pois esses podem levar a problemas geotécnicos. Partículas sólidas não consolidadas interagem com a estrutura de geotêxtil de várias maneiras, podendo resultar em problemas como erosão interna, cegamento (blinding) ou colmatagem física (clogging).

Segundo Silva (2018), no início do processo de desaguamento, a filtração dos materiais em geotêxtil depende da compatibilidade entre a abertura dos poros dos filtros geotêxteis e as partículas sólidas em suspensão. Esse comportamento é controlado pelas propriedades dos materiais geotêxteis, das partículas sólidas e das condições de uso da tecnologia.

O fenômeno da erosão interna, ou piping, ocorre quando partículas finas do solo são perdidas, criando espaços vazios e condições de ruptura. O deslocamento não controlado das partículas sólidas pode levar ao entupimento do leito drenante (URASHIMA, 2002; MUNOZ, 2005; SILVA, 2017).

Pieper (2008) argumenta que, por ser um material contaminado, não é ideal permitir a passagem de material particulado fino, mesmo que isso resulte em aumento da poro-pressão e redução do fluxo, prolongando o tempo de desaguamento. A finalidade do desaguamento é conter o material sólido. A Figura 7 ilustra a perda de partículas através da erosão interna.

Figura 7. Perda de partículas através da erosão interna



Fonte: Vidal & Urashima (1999)

O processo conhecido como cegamento, ou filter cake, acontece quando o material particulado fino migra em direção ao geotêxtil, através do processo de sufusão, e se acumula na superfície interna do tubo, formando uma fina camada de solo (MUNOZ, 2005; SILVA, 2017). Este fenômeno pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8. Formação do *filter cake*

Fonte: Palmeira (2003)

O fenômeno da colmatção física ocorre quando as partículas individuais de solo, ao desaguarem com o material fluido, ficam retidas ao longo da estrutura do filtro (SILVA, 2017). Isso ocorre porque o material de contato possui baixa condutividade hidráulica, impedindo que o geotêxtil se torne menos permeável do que a filter cake, especialmente devido aos caminhos preferenciais formados pela concentração das fibras geotêxteis (SILVA, 2018).

Lawson (2018) destaca a importância de posicionar o recipiente de geotêxtil sobre o leito de drenagem durante o processo de desaguamento. Abaixo do leito, deve-se inserir uma barreira impermeável para sustentar as unidades de desaguamento em geotêxtil e evitar a perda de líquido para os solos circundantes.

No que concerne ao condicionamento químico, é vital melhorar o processo de desaguamento, seja aglutinando as partículas em suspensão para aumentar seu peso específico e maximizar sua retenção, seja acelerando o processo de desaguamento pela redução da resistência à filtração. Assim, a escolha do tipo e da dosagem do condicionante são aspectos cruciais no desaguamento, devendo estar adaptados ao tipo de material a ser tratado (SILVA, 2018; Lawson, 2018; SILVA, 2019).

Entre os polímeros frequentemente utilizados no desaguamento de lodo, destacam-se os sais metálicos, a cal e os polímeros orgânicos. Conforme Di Bernardo (2017), esses polímeros podem ser categorizados como catiônicos, aniônicos, não iônicos e anfotéricos, dependendo de sua estrutura e propriedades ionizáveis.

Como mostrado na Tabela 5, Vertematti (2015) apresenta um resumo dos principais condicionantes químicos utilizados e seus mecanismos de ação.

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.
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.
Hidróxido de Cálcio	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.
Sulfato de Alumínio Policloreto de Alumínio Cloreto Férrico Sulfato ferroso	Cátions polivalentes 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

Diversos estudos foram realizados envolvendo o desaguamento de diferentes tipos de lodo por meio de tubos e bolsas geotêxteis. Esses estudos abrangem uma variedade de materiais, incluindo lodos de estações de tratamento de água e esgoto, rejeitos de mineração, filtração em solo e lama asfáltica.

Martins (2006) investigou a utilização de tubos geotêxteis para desaguamento de rejeitos de mineração, especialmente os materiais particulados finos, obtendo resultados satisfatórios em termos ambientais, com altas taxas de retenção de sólidos em curtos períodos e sem a necessidade de produtos químicos adicionais.

Castro (2005) analisou sistemas de desaguamento de lodo, destacando a aplicação crescente do geotêxtil desde os anos 80 em diversas aplicações, como contenção de materiais granulares e construção de aterros sanitários. O estudo ressalta a importância do dimensionamento do geotêxtil de acordo com as características do material a ser desaguado e a melhoria dos resultados com o uso de produtos químicos e biológicos.

Ferreira e Viana (2013) realizaram ensaios de filtração em cone de geotêxtil para determinar a eficiência de filtração e a qualidade do filtrado. Os resultados mostraram uma redução satisfatória no teor de sólidos no filtrado, indicando a viabilidade do processo de desaguamento sem a necessidade de aplicação de polímeros.

Avancini et al. (2021) avaliaram a influência da gramatura dos tecidos geotêxteis e da dosagem de polieletrólitos no desaguamento de lodo, enfatizando a importância de determinar a dosagem ideal de polímero para cada tipo de lodo, a fim de garantir a eficiência do processo.

Moo-Young et al. (2002) estudaram o uso de tubos geotêxteis para desaguamento de altos conteúdos de lodos e sedimentos, constatando que os tubos em tecido apresentaram melhores taxas de filtração em grandes volumes de lodo, sem dificuldades na retenção de material particulado.

Oliveira e Vidal (2020) investigaram a eficiência do desaguamento de lodo com baixos teores de sedimentos usando bolsas geotêxteis preenchidas com areia fina, alcançando ganhos significativos na eficiência da filtração.

Berilgen e Bulut (2015) realizaram estudos com lodo dragado do fundo do mar, avaliando a eficiência do desaguamento por meio de tubos geotêxteis e diferentes polímeros, obtendo resultados promissores com o uso de polímeros catiônicos.

Silva e Vidal (2021) avaliaram o desaguamento de lodo em diferentes direções usando tubos geotêxteis de diferentes gramaturas, observando altas eficiências de filtração e controle de perda de partículas com a formação precoce do filter cake.

Worley et al. (2007) avaliaram o desaguamento de tubos geotêxteis com coagulantes e polímeros, observando uma separação eficiente de sólidos e líquidos com a aplicação desses compostos.

Ardila et al. (2020) investigaram o desaguamento de lodo de ETA usando diferentes gramaturas de tubo geotêxtil e dosagem de polímero, obtendo eficiências de retenção de sólidos superiores a processos de desaguamento mecanizados e dentro dos padrões estabelecidos para o lançamento de efluentes em corpos d'água.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são apresentados os detalhes do trabalho experimental. Conforme ilustrado na Tabela 6 que foi dividida em 3 etapas. A 1ª ETAPA consistiu na coleta, preparo e caracterização do lodo gerado na estação de tratamento de água localizado 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 condicionante químico com o melhor ajuste ao modelo estatístico proposto (DFC), realização do ensaio de desaguamento de lodo de ETA pressurizado, e análise dos resultados obtidos.

Tabela 6 – Planejamento de pesquisa

1ºEtapa(01/07/22-31/08/22)	2ºEtapa(01/09/22-28/10/22)	3º Etapa (01/11/22 – 23/12/22)
Coleta do lodo da ETA	Planejamento experimental dos ensaios de bancada	Monitoramento dos resultados obtidos através do desaguamento por gravidade
Preparação do lodo	Montagem do sistema de filtração em bancada	Montagem e rodagem do sistema de filtração pressurizado
Caracterização do lodo no laboratório de águas do IFTO	Realização dos ensaios em bancada e análise dos resultados	Análise e validação dos resultados

Fonte: autor (2024)

As etapas foram realizadas no ano de 2022: A etapa 1 foi realizada em Julho e Agosto, a etapa 2 foi realizada em Setembro e Outubro e a etapa 3 foi realizada em Novembro e Dezembro.

As Tabelas 7, 8 e 9 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 7 – 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 de carbono orgânico total (COT)
Balança eletrônica – modelo: Mark L 1002i	Pesagem de condicionantes químicos
Cronômetro Mondaine Stop Watch	Medição de tempo
Espectrofotômetro – marca: HACH – modelo: DR 6000	Leitura de cor aparente de cor verdadeira
pHmetro – marca: Alpax – modelo: Orion Star A211	Leitura de potencial hidrogeniônico
Turbidímetro – marca: HACH – modelo: CAT. No. 2100Q01	Leitura de 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 FED e MED020 – marca: Bal-tec	Microscopia eletrônica de varredura e microanálise química

Fonte: adaptado de Silva (2019)

Tabela 8 – Condicionantes químicos necessários

Produto químico	Nome comercial	Estado físico	Peso Molecular	Carga	Densidade da massa (Kg/m³)
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: adaptado de Silva (2019)

Tabela 9 – Parâmetros e unidades de medida

Parâmetro	Unidade de medida	Método
Alumínio	mg/L Al	EAA – Forno de grafite
Alcalinidade	mg/L CaCO ₃	Titrimétrico
Carbono Orgânico Total	mg/L C	Espectofotométrico infravermelho não dispersivo – NPOC
Carbono Orgânico Dissolvido	mg/L C	Espectofotométrico infravermelho não dispersivo – NPOC
Ferro	mg/L Fe	EAA - Chama
Manganês	mg/L MA	EAA - Chama
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)

4.1 - 1ª Etapa: coleta e caracterização do lodo

A coleta do lodo proveniente da descarga do decantador e da água de lavagem dos filtros ocorreu na ETA sob concessão de uma Companhia de Saneamento localizada em Palmas - TO, e que tem como principal característica a presença de turbidez. Para isso, foi coletado no tanque de equalização uma amostra com volume aproximado de 1000 L na primeira quinzena do mês de Julho de 2022 (ver Figura 9). 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:

- O lodo presente no tanque de equalização foi agitado de modo que não houvesse sólido sedimentado no fundo do tanque.
- Com o auxílio de uma balde graduado e uma corda, foi realizado a descida do balde até o nível da lâmina de lodo;
- Após coletado, o lodo foi armazenado em galões de 50 e 100 L até a obtenção do volume aproximado de 1000 L de “lodo mãe”
- 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 9. Coleta e armazenamento do "lodo mãe": tanque de equalização (1), coleta e transporte do lodo em galões de 50 e 100 L (2), "lodo mãe" no laboratório de análise de águas (3)



Fonte: autor (2022)

Após a etapa de coleta, foram preparadas três amostras de lodo a partir do “lodo mãe” com diferentes concentrações: 2,5g/l; 10,5g/l e 18,5g/l (ver Figura 10). Após preparadas as concentrações de lodo de ETA, foram coletadas quatro amostras, sendo uma do “lodo mãe” e enviados ao Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP, em Ribeirão Preto – SP para a realização dos ensaios físico-químicos descritos na Tabela 9.

Figura 10. 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 mãe”, sendo: CLE01 de 2,50 g/L, CLE02 de 10,50 g/L e CLE03 de 18,50 g/L de SST. Após preparado, foi realizado o ensaio de Sólidos Suspensos Totais para conferir se as concentrações estavam dentro dos valores determinados.

4.2 - 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 condicionante químico, dosagem do condicionante químico 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 condicionante químico e a concentração inicial de SST do lodo. O parâmetro tipo de condicionante químico 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 10.

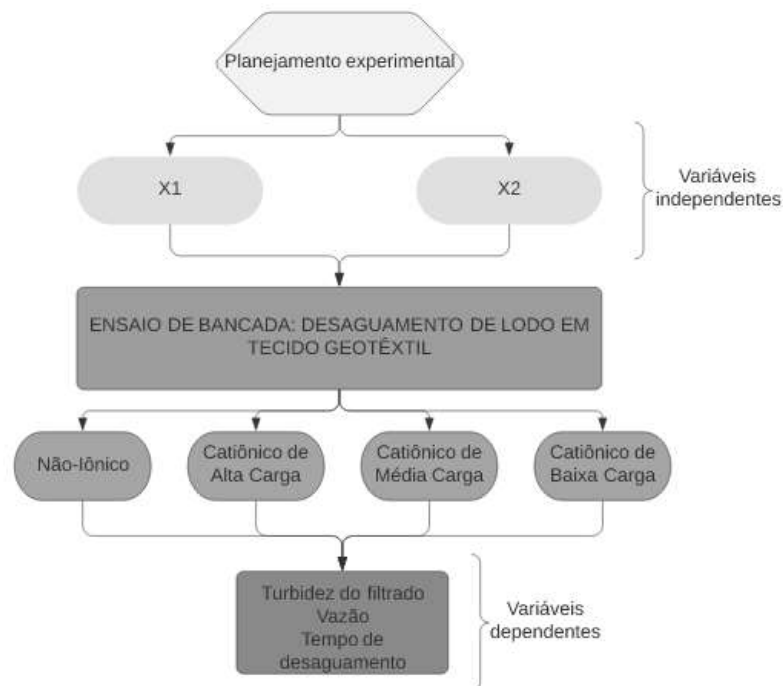
Tabela 10. Condições experimentais das variáveis independentes

Variável quantitativa	Código da variável	-1	0	+1
SST inicial do lodo (g/L)	X1	2,50	10,50	18,50
Dosagem do polímero	X2	1,50	3,75	6,00

Fonte: Autor (2024)

Os valores máximos (+1) e médios (0) da variável X_1 (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_2 (dosagem do polímero), estes se basearam na literatura. Após a definição das variáveis independentes (X_1 e X_2), 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 11 traz uma representação esquemática do planejamento experimental, levando em consideração as variáveis de entrada (independentes), e as variáveis reposta (dependentes).

Figura 11. Representação esquemática do planejamento experimental



Fonte: autor (2024)

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 8, vista anteriormente. Na Tabela 11 é possível visualizar o planejamento dos ensaios realizados para o DFC para cada polímero ensaiado.

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(2,5)	-1(1,50)
4	1(18,5)	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 (2024)

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.

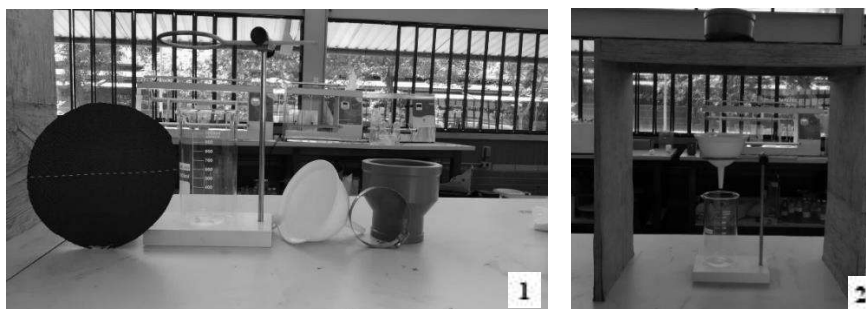
Tabela 12. Propriedades físicas dos geotêxtil ensaiado

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

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 12.

Figura 12. 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).



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 13):

- 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 13. 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 reposta gerados, foi utilizado o software *Protimiza Experimental Deisgn* 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.

4.3 - 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.

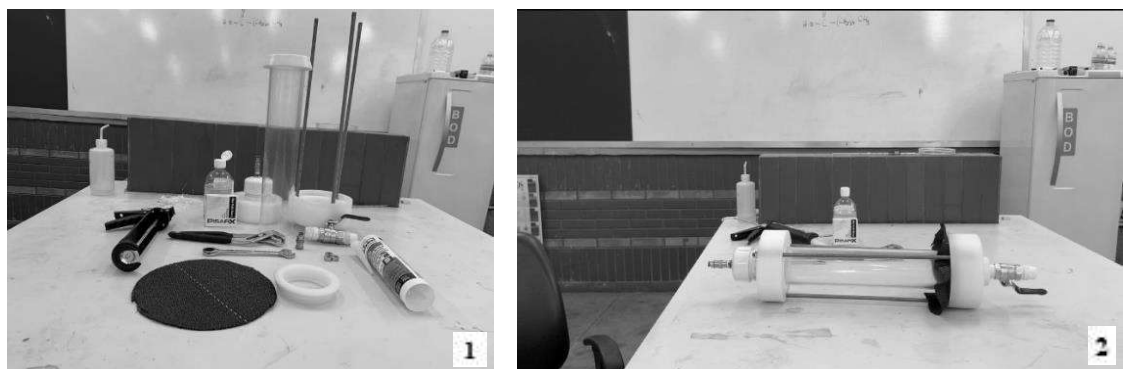
Deste modo, foi definido a metodologia conhecida como *Response Surface Methodology* (RSM), por meio do Delineamento de Face Centrada (DFC). Através da

otimização dos resultados, o DFC buscou auxiliar na avaliação da influência dos parâmetros: dosagem do condicionante químico 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 8.

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 14).

Figura 14. Filtro pressurizado: peças necessárias para a montagem do filtro (1), filtro pressurizado montado (2)



Fonte: autor (2022)

O ensaio do FPG seguiu a seguinte sequência de procedimentos (ver Figura 15):

- 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.

Figura 15. 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).



Fonte: autor (2022)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Temos a seguir, respectivamente, o resultado do ensaio 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 ensaio é 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 Avaliação do desaguamento do lodo de ETA obtido através da filtração por gravidade em tecido geotêxtil com aplicação da metodologia de superfície de resposta.

A Tabela 13 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 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 13: Resultados da Caracterização físico-química dos lodos 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 ₃)	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 (2024)

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 14, 15, 16 e 17.

É possível observar ainda nas Tabelas 14, 15, 16 e 17, 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 14. 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_1	-98,28	34,70	2,83	0,0462	X_1	252,33	129,62	1,95	0,1091
X_1^2	-25,39	57,39	-0,44	0,6766	X_1^2	-58,37	199,48	-0,29	0,7816
X_2	-149,51	37,29	-4,01	0,0102	X_2	352,00	129,62	2,72	0,0420
X_2^2	172,45	57,39	3,00	0,2990	X_2^2	147,63	199,48	0,74	0,4925
$X_1 * X_2$	160,32	45,67	3,51	0,0171	$X_1 * X_2$	244,25	158,75	1,54	0,1845

Fonte: Autor (2024)

Na Tabela 14, referente ao polímero Catiônico 9080-X, é possível observar que os termos quadráticos X_1^2 e X_2^2 , e a média, não apresentaram significância estatística abaixo de 0,100 ($p\text{-valor} < 0,100$) para a variável Turbidez. Já para o Tempo de desaguamento, os termos quadráticos X_1^2 e X_2^2 , o termo linear X_1 e a interação entre variáveis $X_1 * X_2$ não foram estatisticamente significativos.

Tabela 15. 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_1	-66,21	36,41	-1,82	0,1287	X_1	252,50	21,20	11,91	0,0001
X_1^2	36,53	56,03	0,65	0,5432	X_1^2	71,82	32,63	2,20	0,0790
X_2	-70,39	36,41	-1,93	0,1110	X_2	119,83	21,20	5,65	0,0024
X_2^2	73,23	56,03	1,31	0,2481	X_2^2	-59,18	32,63	-1,81	0,1295
$X_1 * X_2$	118,08	44,59	2,65	0,0455	$X_1 * X_2$	134,75	25,97	5,19	0,0035

Fonte: Autor (2024)

Na Tabela 15, referente ao polímero Catiônico 9040-X, é possível observar que apenas a interação entre variáveis $X_1 * X_2$ 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_2^2 não foi estatisticamente significativo.

Tabela 16. 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_1	-3,67	4,87	-0,75	0,4855	X_1	237,67	35,84	6,63	0,0012
X_1^2	-33,63	7,50	-4,49	0,0065	X_1^2	-23,42	55,15	-0,42	0,6888
X_2	-8,51	4,87	-1,75	0,1412	X_2	192,50	35,84	5,37	0,0030
X_2^2	24,99	7,50	3,33	0,0207	X_2^2	89,08	55,15	1,62	0,1672
$X_1 * X_2$	16,58	5,97	2,78	0,0389	$X_1 * X_2$	171,25	43,89	3,90	0,0114

Fonte: Autor (2024)

Na Tabela 16, referente ao polímero Catiônico 9020-X, é possível observar que os termos lineares X_1 e X_2 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_1^2 e X_2^2 não foram estatisticamente significativos.

Tabela 17. 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_1	12,00	3,76	2,20	0,0241	X_1	175,17	39,09	4,48	0,0065
X_1^2	-22,15	5,78	-3,83	0,0122	X_1^2	15,18	60,16	0,25	0,8108
X_2	14,87	3,76	3,96	0,0108	X_2	194,67	39,09	4,98	0,0042
X_2^2	-8,25	5,78	-1,43	0,2126	X_2^2	13,68	60,16	0,23	0,8291
$X_1 * X_2$	4,03	4,60	0,88	0,4215	$X_1 * X_2$	184,50	47,88	3,85	0,0120

Fonte: Autor (2024)

Por fim, na Tabela 17, referente ao polímero Não-iônico 3001-X, é possível observar que o termo quadrático X_2^2 e interação entre variáveis $X_1 * X_2$ não apresentaram significância estatística abaixo de 0,100 ($p\text{-valor} < 0,100$) para a variável Turbidez. Já para o Tempo de desaguamento, os termos quadráticos X_1^2 e X_2^2 não foram estatisticamente significativos.

Na Tabela 18 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 19, 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 18 e 19 mostram que o Polímero Não-iônico de baixa carga foi o mais indicado para o tratamento do lodo da ETA, tendo em vista que este polímero apresenta os melhores resultados, em termos de porcentagem da variância (R^2), 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 18. 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

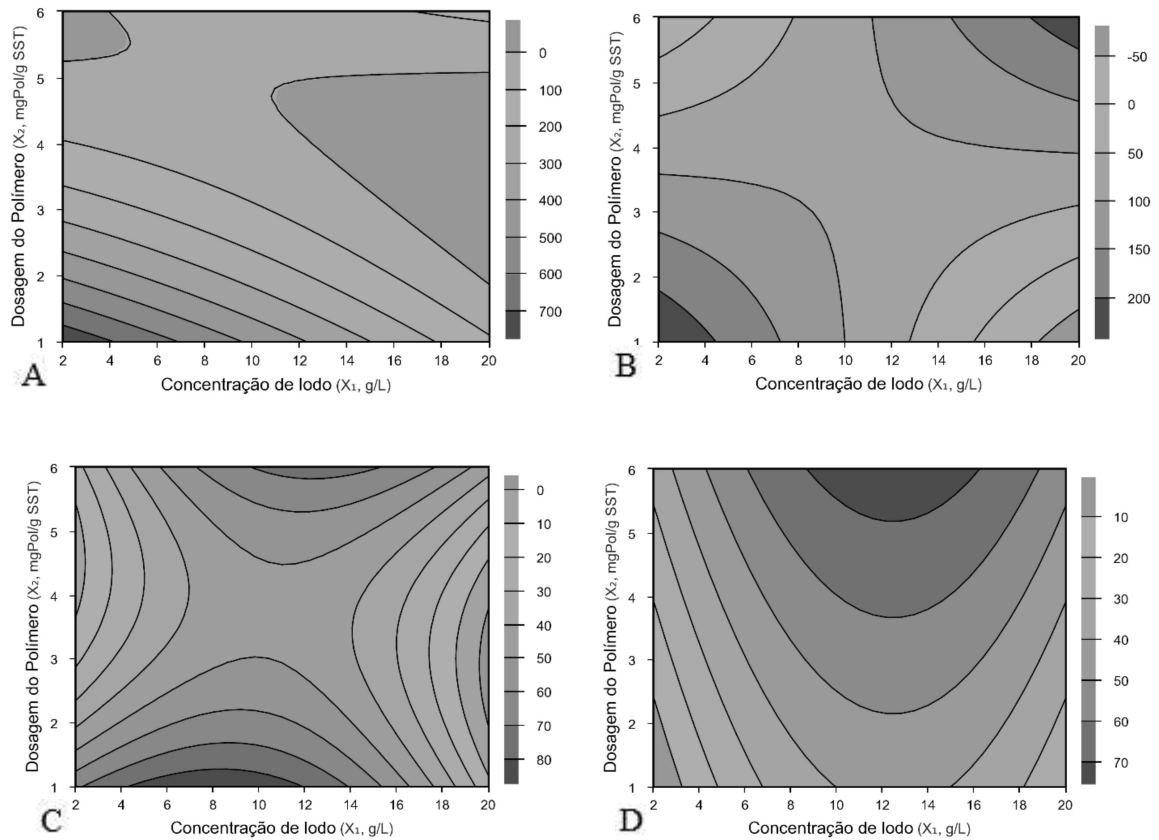
Fonte: Autor (2024)

Tabela 19: 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	Fcalc	Ftab	R ² (%)	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	Fcalc	Ftab	R ² (%)	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

Fonte: Autor (2024)

Figura 16. 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.



Fonte: Autor (2024)

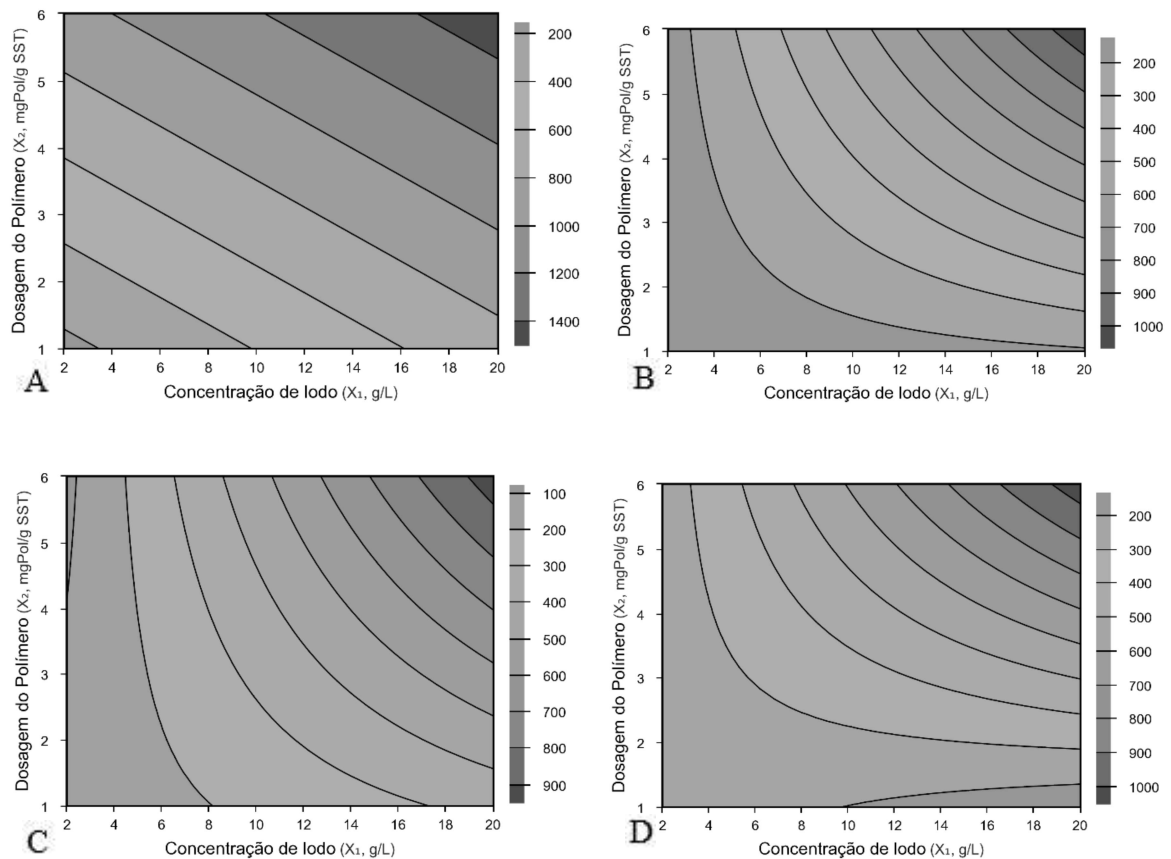
É possível observar na Figura 16 (a) que o polímero catiônico 9080-X apresenta uma remoção de turbidez eficiente, chegando a valores mínimos de 2,54 uT e valores máximos de 417,33 uT para uma dosagem de 1,5 mgPol/gSST, indicando a ausência ou ineficiência do *filter cake* no filtro geotêxtil. Analisando a Figura 16 (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 16 (b), não apresentou uma estatística significativa para o nível de significância de $p\text{ value}=0,05$, possuindo seu valor de $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$, tendo assim seus resultados compatíveis com a hipótese nula sugerida pelo teste da ANOVA.

O polímero catiônico 9020-X, visualizado na Figura 16 (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 consequentemente, quanto maior a concentração do lodo, menor a dosagem necessária de polímero.

A Figura 16 (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 16 (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 17. 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.



Fonte: Autor (2024)

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

A Tabela 20 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 20: 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 ₃)	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 (2024)

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 21, 22 e 23.

Tabela 21. 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

Fonte: Autor (2024)

Na Tabela 21, 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 ($p\text{-valor} < 0,100$). Para o tempo de desaguamento, a variável quadrática X_2^2 não foi estatisticamente significativo.

Tabela 22. 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

Fonte: Autor (2024)

Para a Tabela 22 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 23. 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

Fonte: Autor (2024)

É possível observar a partir da análise da Tabela 23 acima, apenas as variáveis, média e a variável linear X_1 apresentaram significância estatística abaixo de 0,100.

A Tabela 24 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 25, 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 24. 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

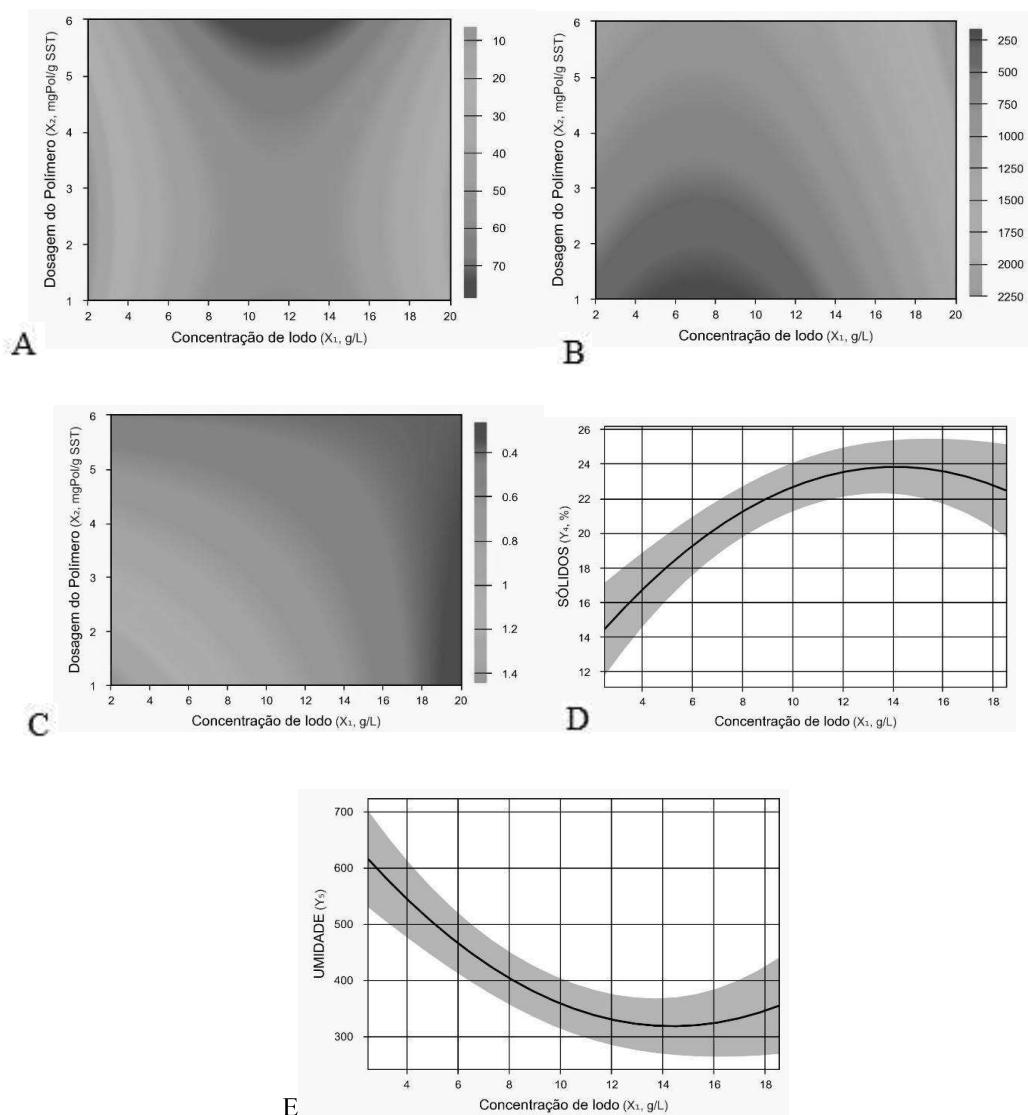
Fonte: Autor (2024)

Tabela 25. 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	

Fonte: Autor (2024)

Figura 18. Curva de contorno da Turbidez do filtrado (A), Tempo de desaguamento (B), Vazão (C), Teor de sólidos do resíduo desaguado (D) e Umidade (E).



Fonte: Autor (2024)

Os gráficos apresentados na Figura 18 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 18A 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 18B e 18C, 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 18D e 18E, 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 consequentemente, 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 condicionante químico, 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 condicionante químico em um sistema de desaguamento em geotêxtil a 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 condicionante químico 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 colmatção 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 71 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.

REFERÊNCIAS

ACHON, Cali Laguna. Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água à luz dos conceitos da ISO 14001. 2008. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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, Local do evento. Anais... Local de publicação: Editora, 2014.

ARDILA, Maria Alejandra Aparicio; SOUZA, Samira Tassarolli de; SILVA, Jefferson Lins da; VALENTIN, Clever Aparecido; DANTAS, Angela Di Bernardo. Geotextile Tube Dewatering Performance Assessment: An Experimental Study of Sludge Dewatering Generated at a Water Treatment Plant. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, v. 12, n. 19, p. 8129, 2020.

AVANCINI, Livia Luiza de Souza; MULLER, Matheus; VIDAL, Delma de Mattos. Application of Polyelectrolytes for Improving the Dewatering Performance of Drinking Water Treatment Sludge Using Geotextiles. *Revista Ambiente & Água*, v. 16, n. 5, p. 1-14, 2021.

BARROSO, Marcelo Melo. Influência das micro e macropropriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leito de drenagem. 2007. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

BERILGEN, Saadet A.; BULUT, Begüm Turan. Laboratory Investigations for Dewatering of Golden Horn Dredged Sludge with Geotextile Tubes. *Marine Georesources & Geotechnology*, v. 34, n. 7, p. 638-647, 2016.

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

DI BERNARDO, L.; DANTAS, D. B. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. 2. 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*. São Carlos - SP: Editora LDiBe, 2012. 540 p.

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.

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.

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.

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; VIDAL, Delma de Mattos. Influence of Sand Addition in the Early Stage Retention of Fine Sludge Dewatering by Geotextile. *Revista Ambiente & Água*, v. 15, n. 3, p. 1-12, 2020. Disponível em: [link]. Acesso em: [data de acesso].

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, 2020.

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. 100 f. Tese (Doutorado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2002.

VERTEMATTI, L. C. *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 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, 2007.