INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS

CAMPUS PALMAS

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

AMANDA ARAÚJO DE CARVALHO

DESAGUAMENTO DE LODO DE ETA ATRAVÉS DE POLÍMERO E TUBO GEOTÊXTIL

PALMAS

2022

AMANDA ARAÚJO DE CARVALHO

DESAGUAMENTO DE LODO DE ETA ATRAVÉS DE POLÍMERO E TUBO GEOTÊXTIL

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

Orientador: Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva

PALMAS

2022

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

C331d Carvalho, Amanda Araújo de
DESAGUAMENTO DE LODO DE ETA ATRAVÉS DE POLÍMERO E TUBO GEOTÊXTIL / Amanda Araújo de Carvalho. – Palmas, TO, 2022.
51 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2022.

Orientador: Dr. Giulliano Guimarães Silva

1. Desaguamento. 2. Tubo geotêxtil. 3. Condicionantes químicos. I. Silva, Giulliano Guimarães. 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 automatica de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

AMANDA ARAÚJO DE CARVALHO

DESAGUAMENTO DE LODO DE ETA ATRAVÉS DE POLÍMERO E TUBO GEOTÊXTIL

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

Aprovado em: 12/12/2022.

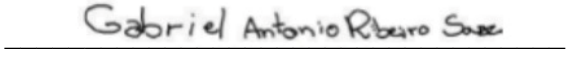
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva



Prof. Me. Adriana Soraya Alexandria Monteiro



Prof. Me. Gabriel Antônio Ribeiro Souza

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus queridos pais, Delzirene e José, que me incentivaram e fizeram grandes sacrifícios para que eu pudesse ter a melhor educação.

À minha tia Ana, que esteve ao meu lado nos momentos difíceis e ao meu tio Antônio, que mesmo não estando aqui não deixou de ser o motivo para que eu não desistisse.

Aos meus professores, que são grandes exemplos na minha carreira.

As grandes amizades que construí ao longo desses anos.

RESUMO

CARVALHO, Amanda Araújo de. **Desaguamento de lodo de ETA através de polímero e tubo geotêxtil**. 2022. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2022.

O sistema de tratamento de água bruta disponível nos mananciais mais comumente usado é a Estação de Tratamento de Água (ETA) convencional, também conhecida como estação de ciclo completo. Durante o tratamento, um resíduo (lodo) é produzido, principalmente da limpeza do filtro e descarga do decantador. Esse lodo varia de acordo com o tipo e a quantidade de produtos químicos utilizados no tratamento e as características do manancial. O contínuo crescimento populacional associado à evolução tecnológica nos últimos anos tem contribuído significativamente para o aumento da produção de lodo, principalmente nas estações de tratamento de água (ETAs). Devido às suas dificuldades logísticas e operacionais, as técnicas de confinamento em geotêxteis têm sido cada vez mais utilizadas. Essa tecnologia de desidratação é responsável por reduzir o volume e estabilizar a fração sólida, reduzindo o impacto ambiental e gerando maior economia de energia em relação a outros processos de desidratação. Diante disso, a aplicação de tubos geotêxteis como técnica de desaguamento em ETA tem sido bastante utilizada, porém ainda são poucos os estudos sobre parametrização de projetos, e o tipo e a dosagem de condicionantes químicos ideais para cada ETA. Portanto, o presente trabalho buscou avaliar, com base em ensaios de bancada, o desempenho do processo de desaguamento de lodo em estações de tratamento de água utilizando tubos geotêxteis, a partir de simulações de diferentes concentrações de Sólidos Suspensos Totais (SST) e condicionantes químicos. Os resultados dos testes de bancada mostraram que a concentração inicial de SST do lodo e a quantidade de condicionante químico não-iônico afetam o tempo de retenção e desidratação do material sólido pelo tecido geotêxtil. Os ensaios de desaguamento de lodo em bancada forneceram os melhores resultados de turbidez quando o lodo foi dosado em 1,5 mgPol/gSST e as concentrações de SST variaram de 2,5 g/L a 18,5 g/L. 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, enquanto que, para o lodo em concentração de 18,5 g/L, a retenção foi de 14,5%. Os resultados obtidos no programa experimental mostraram a viabilidade técnica do desaguamento do lodo da ETA com captação apenas do Ribeirão Taquaruçu por meio de tubos geotêxteis, porém, ensaios em escala real devem ser realizados para confirmar os resultados obtidos nos testes de bancada.

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

ABSTRACT

CARVALHO, Amanda Araújo de. **Dewatering of ETA sludge using polymer and geotextile tube**. 2022. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2022.

The most commonly used raw water treatment system available at the sources is the conventional Water Treatment Plant (WTP), also known as a full-cycle plant. During the treatment, a residue (sludge) is produced, mainly from the cleaning of the filter and decanter discharge. This sludge varies according to the type and amount of chemicals used in the treatment and the characteristics of the source. The continuous population growth associated with technological evolution in recent years has contributed significantly to the increase in sludge production, especially in water treatment plants (WTP). Due to logistical and operational difficulties, geotextile containment techniques have been increasingly used. This dewatering technology is responsible for reducing the volume and stabilizing the solid fraction, reducing the environmental impact and generating greater energy savings compared to other dewatering processes. Therefore, the application of geotextile tubes as a dewatering technique in WTP has been widely used, but there are still few studies on project parameterization, and the type and dosage of chemical conditioning agents ideal for each WTP. Therefore, this study aimed to evaluate, based on bench tests, the performance of the sludge dewatering process in water treatment plants using geotextile tubes, from simulations of different concentrations of Total Suspended Solids (TSS) and chemical conditioning agents. The results of the bench tests showed that the initial TSS concentration of the sludge and the amount of non-ionic chemical conditioner affect the retention and dewatering time of the solid material by the geotextile fabric. The bench sludge dewatering tests provided the best turbidity results when the sludge was dosed at 1.5 mgPol/gSST and the TSS concentrations ranged from 2.5 g/L to 18.5 g/L. It was also evidenced, a retention of 13% of the solids content inside the geotextile tube for sludge with concentration of 2.5 g/L, while for the sludge at concentration of 18.5 g/L, the retention was 14.5%. The results obtained in the experimental program showed the technical feasibility of the dewatering of the WTP sludge with capture only from Ribeirão Taquaruçu by means of geotextile tubes, however, full-scale tests should be performed to confirm the results obtained in the bench tests.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de uma ETA convencional de ciclo completo.....15
Figura 2 - Resíduos gerados em ETAs de ciclo completo.....17
Figura 3 – Exemplos de geotêxteis.....23
Figura 4 - Esquema geral de enchimento e desaguamento.....26
Figura 5 - Tubo experimental preenchido até 1,5 m.....27
Figura 6 – Fluxograma de procedimentos.....29
Figura 7 - Lodo matriz coletado e armazenado em barris.....30
Figura 8 - Preparo das concentrações de lodo definidas.....31
Figura 9 - Fluxograma do planejamento experimental.....33
Figura 10 - 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).....35
Figura 11 – Ensaio de bancada: agitação do lodo com adição de polímero (1); equipamento de filtração em bancada durante desaguamento do lodo floculado (2).....36
Figura 12 – 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 44
Figura 13 – 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 45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros, métodos e limites de medição.....31
Tabela 2 – Condições experimentais das variáveis independentes.....32
Tabela 3 – Produtos químicos utilizados como condicionantes químicos.....33
Tabela 4 – Delineamento de Face Centrada para os ensaios de bancada em tecido geotêxtil.....34
Tabela 5 – Propriedades físicas dos geotêxtil ensaiado.....34
Tabela 6 – Resultados da Caracterização físico-química dos lodos de estudo.....37
Tabela 7 – Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9080-X.....38
Tabela 8 – Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9040-X.....39
Tabela 9 – Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9020-X.....40
Tabela 10 – Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 3001-X.....41
Tabela 11 – 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.....43
Tabela 12 – 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).....43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLE	Concentrações de Lodo de Estudo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DFC	Delineamento de Face Centrada
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
RSM	*Response Surface Methodology*
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SST	Sólidos Suspensos Totais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10

2 PROBLEMA DE PESQUISA 11

3 JUSTIFICATIVA 11

4 OBJETIVOS 12

4.1 Objetivo Geral 12

4.2 Objetivos Específicos 12

5 REVISÃO DE LITERATURA 13

5.1 Legislação 13

5.2 Processos de potabilização da água 15

5.2.1 Resíduos de ETA 16

5.2.2 Disposição final de resíduos de ETAs 18

5.3 Evolução da tecnologia de filtração 19

5.4 Tecnologias de tratamento dos resíduos das ETAs 20

5.4.1 Polímeros 21

5.4.2 Geomembrana (Geotêxtil) 21

5.5 Impacto dos resíduos de ETAs no meio ambiente 23

5.6 Geossintéticos e o seu uso no deságue de resíduos sólidos 25

5.7 Pesquisas desenvolvidas sobre a eficiência de desaguamento por tubos geotêxteis ... 27

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 29

6.1 Coleta e caracterização do lodo 29

6.2 Planejamento experimental e ensaios de bancada 31

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES 37

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS 46

REFERÊNCIAS 47

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 70 anos, a população mundial mais que dobrou, crescendo 169% (UNIC, 2019). Alguns dos efeitos do crescimento populacional são: falta de acesso à água potável, saúde da população e urbanização crescente, às vezes de forma desordenada (BELLAVER; SANTOS, 2019). Nesse contexto, a explosão populacional da última década, aliada ao desenvolvimento socioeconômico, resultou em um aumento anual do consumo de água potável em torno de 1% (UNESCO, 2020).

Ao longo dos anos, as Estações de Tratamento de Água (ETAs) foram implantadas com o objetivo de atender à crescente demanda populacional por água tratada, seja para consumo humano ou para processos industriais. A ETA presta seus serviços retirando impurezas da água que será distribuída às pessoas e garantindo a qualidade e segurança da saúde de quem a recebe. No entanto, essas impurezas, que são os resíduos do processo, devem ser tratadas e dispostas de forma adequada para não gerar impactos ambientais negativos (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013).

Os lodos produzidos na ETA são provenientes da limpeza do decantador ou da descarga e limpeza do filtro. Em uma estação de recirculação completa, a lavagem do filtro produz a maior quantidade desses resíduos em volume, enquanto um decantador produz a maior quantidade de resíduos em massa. Outras atividades da estação, como limpeza de tanques de produtos químicos, também contribuem para a geração desses resíduos (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Embora não seja um problema recente, o impacto da disposição inadequada dos resíduos sólidos das estações de tratamento de esgoto no meio ambiente tem se mostrado prejudicial, principalmente nos grandes centros urbanos, pois o lodo produzido por essas estações contém altas concentrações de metais pesados como alumínio e ferro (BARBOSA, 2000) são tóxicos aos organismos e ao meio aquático se lançados nos cursos d'água sem tratamento.

De acordo com Miki e cols. (2006), o papel das geomembranas na limpeza e secagem do lodo é reduzir seu volume, operar com pequenas ou grandes quantidades deste material, reduzir o espaço de armazenamento, possibilitar o reaproveitamento de sólidos, controlar o uso de produtos químicos, reduzir o consumo de energia, reduzir a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), etc.

Achon; Barroso e Cordeiro (2008) mencionam que os métodos atualmente utilizados a tratar são divididos em naturais (leitos de secagem e lagoas de sedimentação) e mecânicos (filtros a vácuo, filtros prensa e centrífugas).

Diante deste tema, a contribuição científica deste estudo é validar os parâmetros de teor de sólidos totais em suspensão, dosagem de polímeros e tipo de textura de geotêxteis em diferentes concentrações de lodo resultantes da decantação e filtração, duas principais etapas de potabilidade da água na estação de tratamento. A requerida parametrização fez-se necessária para a validação da importância de tais variáveis para um processo de desaguamento eficiente, de modo a evitar processos mecanizados com altos custos energéticos.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

O presente trabalho através de pesquisas buscará responder a seguinte problemática: "Qual o teor mínimo de polímero para jogar no BAG, considerando boa turbidez e desaguamento eficiente?".

3 JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, intensificaram-se no desenvolvimento de diferentes processos e tecnologias para o tratamento de resíduos da ETA. No entanto, poucos trabalhos científicos envolvem o uso de filtração geotêxtil para tratar resíduos de estações de tratamento de água. Atualmente, existem muitas incertezas sobre quais parâmetros de projeto devem ser empregados e qual combinação química e condicionante químico otimiza o desaguamento.

A água é um dos recursos naturais mais importantes na vida de todos. Sua qualidade é um tema inevitável. Como o nome descreve, as estações de tratamento de água removem a sujeira por meio de processos físicos e químicos. A água torna-se potável e própria para consumo, porém, a sujeira fica retida e precisa ser retirada da ETA, tornando o processo de tratamento contínuo e eficiente. Esse resíduo, conhecido como "lodo de ETA", também deve ser tratado e ter destinação adequada.

No entanto, a maioria das ETAs do país jogam esses resíduos em cursos d'água, causando todo tipo de dano aos corpos hídricos que os recebem. Essa é uma responsabilidade ambiental significativa, muitas vezes não monitorada, e os franqueados não se sentem pressionados a formalizar essa grande questão. De acordo com a lei 9.433/97, Política Nacional de Recursos Hídricos, identifica esta ação como crime ambiental, e traz como conteúdo,

exigências de nova postura em relação ao tratamento de água e a destinação dos resíduos gerados (CORDEIRO, 2001).

A destinação inadequada dos resíduos gerados no processo de purificação da água significa impactos negativos imensuravelmente diversos, incluindo a grande quantidade de resíduos gerados no processo e suas graves consequências para o meio ambiente, como: assoreamento de cursos d'água, poluição do solo e nascentes urbanas, além de agravar escassez de suprimentos e água potável, mortalidade de animais e plantas, disseminação de doenças para pessoas, etc. (ANDREOLI, 2001).

Desta forma, a busca por alternativas de tratamento do lodo gerado em ETAs é de suma importância. A adequação destas se faz necessária conforme legislação vigente e a procura por destinação adequada dos resíduos é algo inevitável para os dias de hoje.

Por isso, a pesquisa sobre o tratamento e disposição final desses resíduos tem se tornado cada vez mais importante, além de buscar uma gestão adequada para minimizar o volume de material a ser descartado e reduzir o custo de transporte e disposição final (FONTANA, 2005).

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar o processo de desaguamento dos lodos gerados na descarga do decantador e lavagem dos filtros da ETA da região norte do Brasil, com captação apenas do Ribeirão Taquaruçu, através de ensaios de semi-desempenho em bancada, simulando o processo de filtração por meio de tecido geotêxtil, considerando variações no teor de Sólidos Suspensos Totais (SST) do resíduo e condicionante químico.

4.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaios de bancada para a avaliação de diferentes tipos e dosagens de polímeros no desaguamento dos resíduos gerados na ETA da região norte do Brasil com captação do Ribeirão Taquaruçu, filtrados em tecido geotêxtil;
- Caracterizar e analisar a fração líquida desaguada em termos de turbidez, sólidos suspensos totais e vazão do filtrado;
- Analisar, através de ferramenta estatística decorrente do planejamento experimental, a influência da concentração de SST do lodo, a dosagem do polímero no desaguamento e a taxa de filtração.

5 REVISÃO DE LITERATURA

O abastecimento de água, na maioria das cidades brasileiras, é baseado na qualidade do líquido fornecido aos clientes. Mas, em vez disso, os problemas com a qualidade da água do rio usada para tratamento e distribuição são muito agravados e levam a maiores concentrações dos produtos químicos usados para tratá-la. Como resultado, os resíduos das estações de tratamento de água aumentaram significativamente (PORTELLA; ANDREOLI; HOPPEN; SALES; BARON, 2003).

A destinação correta do lodo das estações de tratamento de água é comum em países desenvolvidos. Nos Estados Unidos, Alemanha e Japão, os resíduos da ETA são utilizados na agricultura. Na indústria siderúrgica da Holanda e países em desenvolvimento, os efluentes são lançados diretamente em cursos d'água sem tratamento (MORITA, 2008).

5.1 Legislação

A partir da década de 1970, a atenção global à proteção ambiental cresceu consideravelmente, com o surgimento de novas legislações e políticas nacionais que não são apenas economicamente motivadas, mas também enfatizam a necessidade de proteger o patrimônio coletivo. O evento foi em grande parte impulsionado pela Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, em Estocolmo, 1972.

A participação do Brasil nessa reunião resultou na criação da Secretaria Especial do Meio Ambiente pelo Decreto nº 73.030, de 30 de outubro de 1973. O mandato da secretaria é colaborar com entidades públicas e privadas para conservação, restauração e avaliação das características ambientais. Podendo restringir a implantação de negócios prejudiciais ao meio ambiente, limitando financiamentos ou incentivos fiscais.

Em 1981, com a aprovação da Lei nº 6.938, foi criado o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), órgão consultivo e deliberativo que trata da política ambiental nacional. Em 2005, o CONAMA editou a Resolução 357 sobre classificação de corpos d'água, diretrizes ambientais e normas para lançamento de efluentes.

Em 2004, o Ministério da Saúde publicou a Portaria nº 518, que regulamenta os parâmetros de qualidade, padrões de consumo, procedimentos e responsabilidades dos sistemas de abastecimento de água para consumo humano. O regulamento estabelece em seu artigo 8º que o controle da qualidade da água é de responsabilidade do operador do sistema.

Os padrões de consumo definidos pelo regulamento MS 518/2004 em seu quarto capítulo especificam os valores máximos permitidos para: Padrões Microbiológicos, Padrão de turbidez, Substâncias Químicas, Agrotóxicos, Ciano toxinas, Desinfetantes, Radioatividade e Metais.

Em 7 de maio de 2021, o Ministério da Saúde publicou a Portaria nº 888, que define o padrão de água potável para seres humanos. Esta legislação substitui os padrões de potabilidade definidos no anexo XX da Portaria de Consolidação Nº 05 de 2017.

Entre as principais mudanças, destacam-se alterações no texto de definição, mudanças nas responsabilidades dos poderes públicos e responsáveis pelos sistemas hídricos, ajustes no escopo do monitoramento analítico e seu VMPs (Valor Máximo Permitido) e mudanças nos Planos de Amostragem.

A Portaria nº 888, assim como a anterior Portaria de Consolidação (PRC) nº 5 Anexo XX, é aplicada aos responsáveis por sistemas de abastecimento de água ou pelas Soluções Alternativas Coletivas de Abastecimento de Água.

Embora não se aplique aos estabelecimentos consumidores (empresas, condomínios, hospitais), o regulamento é a principal referência normativa para os padrões de potabilidade.

Com a vigência da Portaria GM/MS nº 888, foram identificadas algumas alterações relacionadas à antiga legislação.

No Padrão de Potabilidade para substâncias químicas, na Portaria nº 888, algumas substâncias foram retiradas, os valores máximos permitidos em alguns compostos foram alterados e parâmetros como a epicloridrona também foram incluídos. Quanto ao padrão de Cianotoxinas, o parâmetro Cilindrospermopsinas é incluído para contagens de células cianobacterianas acima de 20.000 células/mL. Para o padrão organoléptico, os seguintes parâmetros foram removidos: surfactante, tolueno e xileno. Os valores máximos para alguns compostos também mudaram.

O Anexo 13 especifica o número mínimo e a frequência de amostras para controle físico-químico da qualidade da água. Entre eles, acrescentam-se apenas os parâmetros de epicloridrina, que devem ser analisados mensalmente, e os parâmetros de cloreto de vinila, que devem ser analisados semestralmente.

O Decreto nº 888 entrou em vigor na data de sua publicação. As amostras colhidas após 7 de maio de 2021 devem ter como base os valores propostos na legislação vigente para garantir a segurança hídrica aos consumidores finais.

5.2 Processos de potabilização da água

Sem água de qualidade, não há vida de qualidade. Portanto, a ETA surgiu para eliminar os riscos presentes nas águas da fonte de abastecimento através de um processo contínuo de combinação para atingir a qualidade adequada para o uso adequado. Do ponto de vista técnico, a água de qualquer qualidade pode teoricamente ser convertida em água potável, mas os custos envolvidos e a confiabilidade de operação e manutenção podem simplesmente impossibilitar o uso de determinado curso d'água como fonte de abastecimento (DI BERNARDO e PAZ, 2008).

O tratamento da água para consumo humano é necessário para proporcionar às pessoas melhor qualidade de vida, saúde e saneamento adequado. Os parâmetros de qualidade da água para consumo humano são determinados pela Portaria n° 888/2021 do Ministério da Saúde.

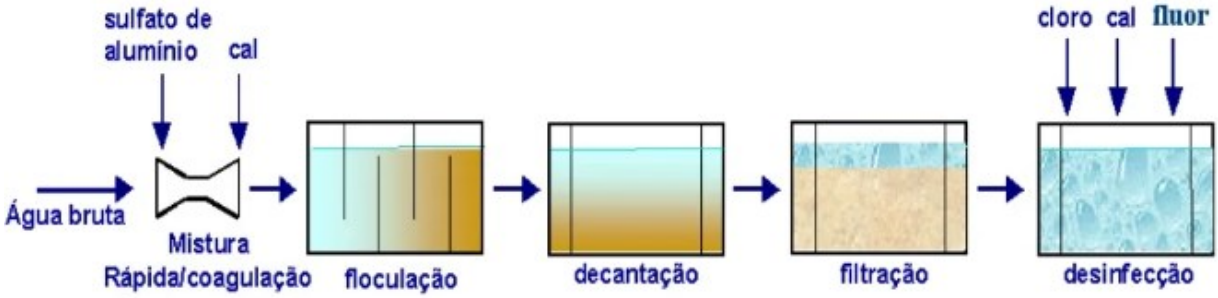
O processo convencional de tratamento de água é composto pelas seguintes etapas:

- Captação;
- Floculação;
- Decantação;
- Filtração;
- Desinfecção; e
- Fluoretação.

O processo de floculação é a etapa de adição dos produtos químicos necessários para ligar o material particulado em suspensão, que se depositará durante a decantação. A próxima etapa, a filtração, é projetada para reter o material não retido no decantador.

Filtros em estações de tratamento de água normalmente consistem em várias camadas de material particulado que crescem em tamanho à medida que o fluxo aumenta, a Figura 1 exemplifica o esquema de uma ETA convencional de Ciclo Completo.

Figura 1 – Esquema de uma ETA convencional de ciclo completo



Fonte: Ministério da Saúde (2013)

A desinfecção por adição de cloro visa garantir a não proliferação de organismos prejudiciais à saúde humana. O cloro adicionado deve estar presente em qualquer lugar da rede de distribuição de água, com teor mínimo de 0,5 mg/l, e é chamado de cloro residual (VIANNA, 1997).

A fluoretação, adição de flúor à água tratada, tem como objetivo reduzir a ocorrência de problemas dentários, como a cárie.

O objetivo de um sistema de tratamento de água é remover qualquer tipo de contaminação, evitar a propagação de doenças e alterar a água bruta para as propriedades necessárias para o uso.

5.2.1 Resíduos de ETA

As estações de tratamento de água produzem resíduos conhecidos como "lodos", que incluem água, sólidos removidos da água bruta e produtos de reações após a adição de produtos químicos ao processo.

O principal resíduo da ETA com tecnologia de ciclo completo é o lodo do decantador e da água de lavagem do filtro (ALAF). As principais perdas de água nesses sistemas se devem à necessidade de limpeza da unidade de tratamento para retirada de resíduos (lavagem de floculadores, decantadores e filtros) e vazamentos na unidade e/ou tubulação. O lodo é definido como resíduo sólido e, portanto, deve atender à Lei 12.305/2010 (Artigo 3º, inciso XVI) (Brasil, 2010) e uma série de normas NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004).

Os resíduos produzidos na ETA consistem em impurezas presentes na água bruta, produtos químicos utilizados no processo de tratamento e subprodutos das interações (FONTANA, 2004).

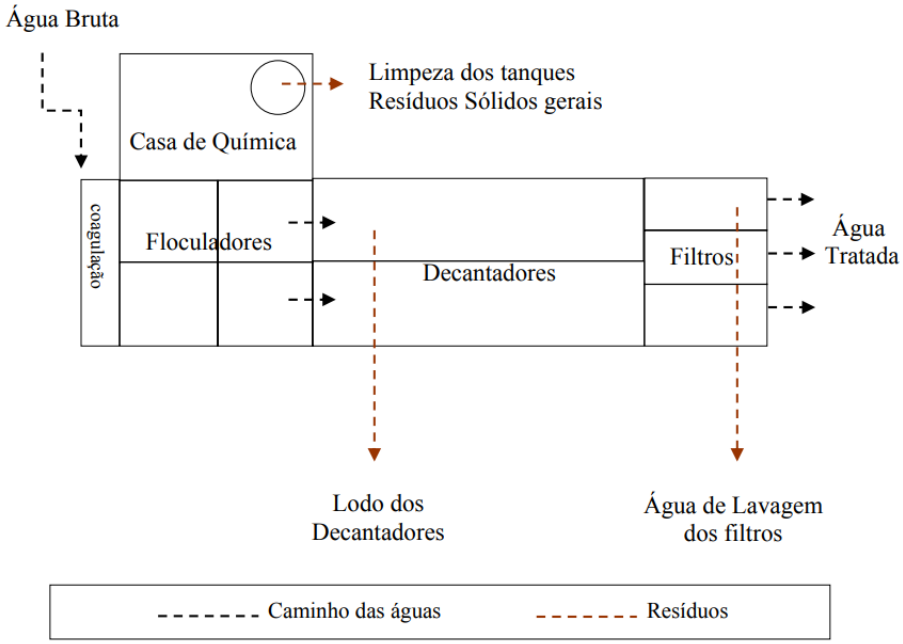
Os resíduos das estações de tratamento de água geralmente são provenientes das etapas de decantação e filtração. A destinação deste material pode ser realizada por lançamento na rede de esgoto, ou transportado para aterro sanitário ou outra destinação final. Para o transporte economicamente viável desse resíduo, é necessário reduzir o volume desse material, desaguando, o que pode ser feito por:

- Filtros prensas;
- Filtros de esteira;
- Leitos de secagem;
- Centrifugação; e
- Geofôrmas.

Esses processos visam retirar gradativamente a água contida no lodo para obter uma torta de filtro com teor de sólidos suficiente para transporte e destinação final (REALLI, 1999).

A Figura 2 ilustra, resumidamente, as unidades que compõem o tratamento e seus pontos de geração de resíduos para uma ETA de ciclo completo.

Figura 2 - Resíduos gerados em ETAs de ciclo completo



Fonte: Fontana (2004)

Durante o processo de descarga do decantador, a quantificação da água descartada é de fundamental importância para a formulação do projeto de tratamento de lodo ETA de ciclo completo. A água de lavagem de filtro é considerada a segunda maior quantidade de rejeito produzido em uma ETA convencional e apresenta características bastantes distintas das ETAs que utilizam coagulantes a base de sais de ferro e de alumínio (FONTANA, 2004).

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica resíduos sólidos como:

> Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Esta norma divide os resíduos sólidos em três classes:

- Resíduo perigoso - classe I;
- Resíduo não inerte - classe II-A; e

- Resíduo inerte - classe II-B.

Portanto, o lodo de estações de tratamento de água é classificado como resíduo sólido, embora seu principal componente seja a água, o que não permite seu lançamento natural em corpos hídricos superficiais.

Andreoli (2001) observou que a prática de liberação de substâncias de descargas de decantadores é uma prática comum na maioria das ETAs brasileiras, com impactos ambientais, às vezes severos. Apenas a devida atenção é dada ao desperdício da ETE. A ocupação das áreas protegidas leva à degradação dos mananciais, resultando no aumento do consumo de produtos químicos para tratamento de água, que por sua vez gera mais resíduos.

> Os lodos gerados nos decantadores das ETAs são resultados dos processos e operação de coagulação/floculação e sedimentação das partículas presentes na água bruta. Essas partículas sofrem ação de reações químicas e operação física de formação de flocos que se tornam propícios para a operação de sedimentação ou de flotação. O material removido da água bruta é retido em tanques por certo tempo e disposto, quase sempre, em cursos d'água. Os rejeitos de ETAs são compostos basicamente de partículas do solo, material orgânico carreado para água bruta, subprodutos gerados da adição de produtos químicos e água. As partículas presentes na água a ser tratada são basicamente colóides que conferem à mesma cor e turbidez. Os colóides têm tamanho que varia de 1 nm (1 nm = 10–6 mm) a 1 mm (1 mm = 10–3 mm). Essa característica dificulta a remoção da água livre dos lodos (ANDREOLI, 2001).

5.2.2 Disposição final de resíduos de ETAs

No Brasil, na maioria dos casos, os resíduos do tratamento de água são lançados diretamente nos cursos d'água, o que é considerado um crime de poluição ou ambiental. No entanto, os departamentos de defesa e proteção ambiental não têm realizado questionamentos quanto a essa prática.

Hoppen (2005) acredita que para escolher o melhor método de disposição final deve-se considerar a quantidade e as características do lodo, bem como o custo inerente à solução empregada.

Para a utilização do lodo da ETA para fins agrícolas ou em áreas degradadas por atividades de mineração, é necessário considerar o impacto dos metais pesados presentes nesses resíduos, que podem causar impactos ambientais nos sistemas solo-planta. O lodo de ETE tem maior potencial de fertilização (ANDREOLI, 2001).

Dias (2004) investigou alternativas para a destinação final do lodo da ETA Meia Ponte em Goiânia/GO, utilizando o resíduo utilizado na confecção de blocos cerâmicos, onde o percentual máximo de lodo adicionado à argila para a produção de blocos foi definido em 20%. As lamas estudadas contêm grandes quantidades de argila em sua composição. Ele enfatizou

que a liberação desses materiais na natureza pode ter um grande impacto no meio ambiente devido às altas concentrações de alumínio.

O lodo de estação de tratamento de esgoto pode substituir certa quantidade de agregado miúdo na matriz de concreto como forma alternativa de destinação final. No entanto, a adição desses resíduos reduz a resistência final do concreto e aumenta sua absorção de água, resultando em redução da durabilidade e é recomendada para concretos não estruturais (HOPPEN, 2005).

De Deus (1996) estudou a codisposição de resíduos de ETA em aterros sanitários, ressaltando que é importante estudar a lixiviação de metais pesados presentes no lodo e a resistência do lodo de ETA à passagem de água para reduzir o efeito da hidrólise da fermentação na matéria orgânica, concluindo que, a adição de lodo ETA pode manter o valor de pH próximo à faixa neutra.

5.3 Evolução da tecnologia de filtração

O uso de geotêxteis para desaguar resíduos contaminados, incluindo resíduos sanitários (ETA e ETE), começou no final da década de 1980 (FOWLER; DUKE; SCHMIDT; CRABTREE; BAGBY; TRAINER, 2002). Desidratação em tubos geotêxteis é o processo de bombeamento de material líquido em suspensão em um tubo ou série de tubos para facilitar a remoção de água. A tecnologia utiliza as propriedades hidráulicas dos geotêxteis para suspender a água, retendo sedimentos e poluentes.

Segundo Lawson (2008), ao contrário de outras tecnologias, os geotêxteis podem ser fabricados em tamanhos específicos e projetados para atender às necessidades de operações específicas de desaguamento. Esses tubos também são fáceis de transportar e usar e são mais econômicos do que outros sistemas.

Embora o uso de geotêxteis em processos de desidratação de resíduos esteja em pleno andamento, o conceito não é novo. Os geotêxteis foram patenteados em 1967 pela empresa dinamarquesa Aldek, A.S. Eles foram usados pela primeira vez em estruturas marinhas no final da década de 1960. Ao longo dos próximos anos, o uso desta tecnologia em aplicações marítimas tornou-se mais comum. Hoje, os tubos são usados em várias configurações em todo o mundo.

A utilização de geotêxteis para desaguamento de resíduos contaminados tem crescido exponencialmente nos últimos anos, impulsionada pela legislação ambiental mais rigorosa e a consequente necessidade de métodos de desaguamento eficientes e de baixo custo. Os tubos são fabricados e/ou vendidos em praticamente todas as regiões do mundo. A tecnologia tem

sido adotada por grandes indústrias produtoras de resíduos de alta umidade, como agronegócio, saneamento (tratamento de água e efluentes), papel e celulose, mineração, dragagem e processamento de alimentos.

5.4 Tecnologias de tratamento dos resíduos das ETAs

Em suma, o Sistema de Abastecimento de Água (SAA) é composto por nascentes, que são mananciais superficiais ou subterrâneos, utilizados para abastecer, captar e coletar água bruta; tubulação, que conduzem a água das nascentes até a ETA, e da estação de abastecimento até os reservatórios de distribuição (CESAN, 2013).

Segundo Haak (2011), a maior parte dos resíduos gerados pela ETA é de difícil desaguamento mecânico. Isso se deve a vários fatores. As partículas de lodo são carregadas e tendem a se repelir em vez de formar flocos. Devido ao pequeno tamanho dos flocos de lodo, eles podem causar entupimento do meio filtrante ou resultar em baixa qualidade do filtrado. Além disso, devido à hidratação, uma ou mais camadas de água aderidas à superfície das partículas formam um filme que impede que elas se aproximem para formar flocos.

Portanto, é necessário condicionar o lodo com antecedência para melhorar a eficiência do processo de desidratação. Portanto, o processo de condicionamento visa melhorar as propriedades estruturais do lodo, permitindo drenagem livre, aumentando a recuperação de sólidos e minimizando o tempo de ciclo do processo de desaguamento (HAAK, 2011).

Conforme descrito por Ferreira e Sobrinho (1998), o condicionamento químico visa preparar o lodo para as operações subsequentes de desaguamento, ou seja, retirar o máximo de água possível do aterro e reduzir o volume para disposição final. A desidratação pode ser realizada por métodos mecânicos ou naturais.

Os principais métodos de condicionamento do lodo são: congelamento, tratamento térmico, aplicação de auxiliares físicos de filtragem e aplicação de produtos químicos (FREITAS; BRINK; FILHO, 2005).

O método de condicionamento mais utilizado nos processos de densificação e desidratação é aplicação de produtos químicos. Os produtos químicos utilizados podem ser íons metálicos, cal e polímeros, sendo estes últimos os polímeros mais utilizados no acondicionamento de lodo de estação de tratamento de esgoto (HAAK, 2011).

A seleção do melhor polímero só pode ser feita por meio de testes em escala laboratorial e otimização do processo em escala real. Sua seleção não pode ser baseada apenas nos

resultados experimentais obtidos, mas também em uma análise econômica do binômio de dosagem do polímero (FERREIRA e SOBRINHO, 1998).

5.4.1 Polímeros

Polímeros são moléculas orgânicas e solúveis em água com longas cadeias moleculares e alto peso molecular. A principal função do polímero é aumentar o tamanho das partículas de lodo. Este aumento de tamanho resulta em uma diminuição na área de superfície específica por unidade de peso de sólidos de lodo. Desde que a resistência à desidratação é relacionada com perdas por atrito superficial, um aumento no tamanho da partícula reduzirá a área superficial na matriz do lodo, melhorando assim, as taxas de desidratação (HAAK, 2011).

Com base na carga de seus grupos funcionais, os polímeros que podem ser usados para o condicionamento de lodo são divididos em três tipos: catiônicos, aniônicos e não iônicos. Em geral, os melhores resultados de desidratação são obtidos quando são usados polímeros e cargas de alto peso molecular.

Deve-se ressaltar que a eficiência do condicionamento de lodo com polímeros depende de vários fatores. Os fatores que afetam a desaguabilidade do lodo são: dosagem do polímero, tempo de mistura e gradiente médio de velocidade (HAAK, 2011).

As especificações para o melhor polímero a ser utilizado devem ser analisadas por meio do desenvolvimento de testes laboratoriais que representem o processo de desaguamento do lodo o mais próximo possível da realidade. Tal especificação não deve ser baseada apenas nos resultados experimentais obtidos, mas também na análise do binômio de dosagem do polímero (AWWA, 1989).

5.4.2 Geomembrana (Geotêxtil)

Geomembrana é um material sintético flexível, feito de produtos sintéticos ou betuminosos, cuja função é fornecer uma camada impermeável para controlar a permeação e fluxo de líquidos e, em alguns casos, gases (VAN SANTVOORT, 1994).

A estrutura do geotêxtil está relacionada ao seu processo de formação e ao uso de aditivos químicos para obtenção de diferentes estruturas. Variações em determinados parâmetros inerentes ao processo de fabricação podem fazer com que os materiais tenham propriedades diferentes, como a espessura, o tamanho de suas “constrições”, ou seja, os poros ou vazios entre as fibras do geotêxtil.

Segundo Guanaes (2009), os geotêxteis são mantas feitas de fibras ou filamentos têxteis permeáveis e bidimensionais, e suas propriedades mecânicas e hidráulicas os tornam amplamente utilizados na engenharia geotécnica.

A utilização de geotêxteis em um sistema de tratamento de resíduos de ETE envolve a drenagem do líquido através de pequenos poros no material geossintético, desaguando gradativamente e reduzindo o volume inicial, eliminando assim o excesso de água no lodo (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

O lodo, seja depósito de argila ou resíduo industrial, ao passar pelo processo de filtração geotêxtil, a maioria dos resultados mostram que a retenção de partículas pelos geossintéticos cessou rapidamente e a água filtrada ficou mais limpa.

O método de desaguamento de geotêxteis envolve o preenchimento de um grande saco de geotêxteis costurados que retêm uma grande quantidade de material. Quando preenchido com material granular, este libera um líquido que retém o lodo em seu interior (TOMINAGA, 2010).

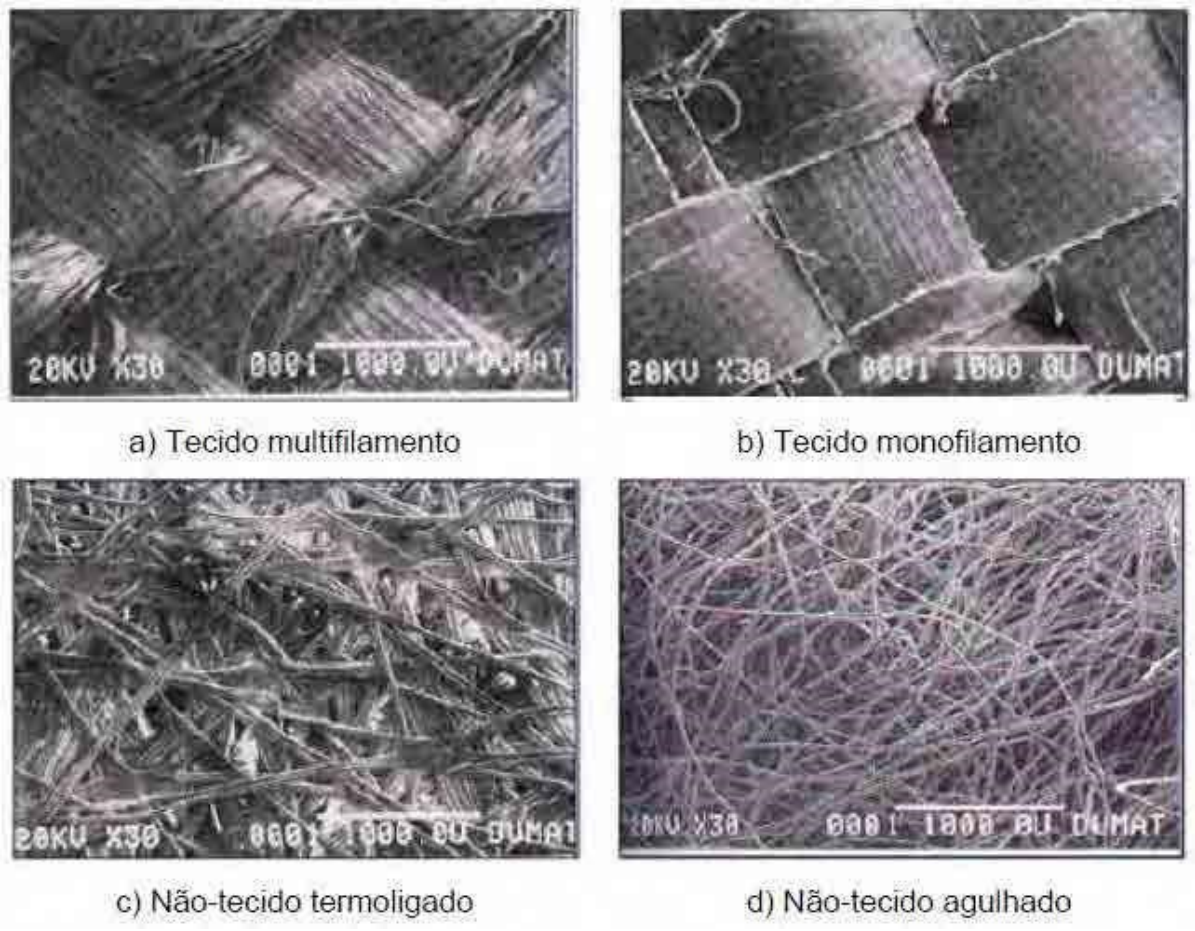
É uma prática muito comum adicionar polímeros a materiais que precisam ser desidratados. Esses produtos químicos são chamados de aditivos ou floculantes e, por meio de uma reação química, combinam-se com os constituintes do material a ser desaguado para formar flocos, permitindo a avaliação de geossintéticos no tratamento de água, desaguamento de resíduos sólidos e poluição geológica. mais eficiente e reduz o risco de entupimento de geotêxteis com partículas finas comumente encontradas em materiais do tipo silte (Vidal, 2003).

Os filtros têxteis são fabricados de acordo com as características do processo de fabricação, não apenas pela espessura do fio, mas também pela confiabilidade de manter um determinado tamanho de partícula, que é determinado pelo fabricante (Urashima, 2002).

Os geotêxteis são produtos semelhantes a mantas feitos de fibras ou filamentos têxteis, permeáveis e bidimensionais, podendo ser utilizados em diversas aplicações geotécnicas, com funções de separação, drenagem, filtragem, reforço, proteção e restauração de pavimentos flexíveis (GUANAES, 2009).

A Figura 3 demonstra alguns exemplos de geotêxteis tecidos e não tecidos sendo possível perceber a trama definida dos tecidos e a aleatoriedade de fibras dos não-tecidos.

Figura 3 – Exemplos de geotêxteis



Fonte: Sampaio (2011)

5.5 Impacto dos resíduos de ETAs no meio ambiente

O crescimento populacional e o crescimento constante da urbanização são evidentes na maioria das cidades do Brasil. Em qualquer projeto de saneamento realizado, é necessário um estudo para prever o crescimento populacional em uma média de 20 a 30 anos. Este aumento reflete a procura de bens de consumo, incluindo a água para consumo humano que deve ser produzida na estação, o que resultou num aumento dos resíduos gerados pela ETA, para além do aumento da produção de águas residuais.

A crescente demanda por distribuição de água tratada e os altos níveis de poluição estão impactando drasticamente a disponibilidade e qualidade da água, realidade que reforça a importância da proteção dos corpos d'água em todos os locais.

De acordo com Assis (2014), assim como a caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos da ETA, o impacto ambiental resultante também está relacionado à natureza da água

bruta, à dosagem dos produtos químicos utilizados no tratamento e à forma como os filtros e decantadores são limpos e operado.

O lodo de decantadores e filtros é classificado como 'resíduo sólido' pela ABNT NBR 10.004 - Classificação de resíduo sólido, devendo, portanto, ser manuseado e descartado conforme exigido pelos órgãos reguladores.

Ainda hoje, a disposição final desses resíduos é em hidrovias próximas à ETA. Com o aumento da conscientização e dos regulamentos, essa maneira de lidar com o lodo foi restringida ou proibida. Uma vez que a presença de patógenos como ovos de Giardia e Cryptosporidium apresentam riscos à saúde da população e ao meio ambiente, essa prática de descarte de resíduos tem sido amplamente discutida pelos órgãos ambientais (ENGEVISTA, 2012).

Segundo Sousa (2009), os resíduos das ETAs são potencialmente tóxicos e poluentes para organismos aquáticos, humanos, plantas e meio ambiente. As propriedades tóxicas desses rejeitos dependem de fatores como: características da água bruta; dosagem e produtos químicos utilizados e possíveis contaminantes no produto; métodos de remoção do lodo; tempo de residência do lodo nos decantadores; reações químicas; propriedades físicas, químicas, biológicas e hidráulicas dos corpos d'água.

A descarga desses resíduos da ETA em nascentes é extremamente perigosa ao meio ambiente devido à presença de metais tóxicos e altas concentrações de sólidos, que podem afetar o meio ambiente alterando o ecossistema local e inibindo a atividade biológica. O lançamento desses resíduos em redes pluviais ou diretamente em rios é uma prática ainda utilizada pela maioria das empresas de saneamento (PEREIRA, 2011).

Souza (2009) relatou que o manuseio de resíduos de ETE em corpos d'água os torna vulneráveis à degradação da qualidade da água e dos sedimentos nesses ambientes, pois, além de ocorrer a existência de metais pesado, apresentam altas concentrações de sólidos, turbidez e Demanda Química de Oxigênio (DQO), levando à formação de bancos de lodo, assoreamento, alterações de cor e alterações na composição química e biológica do corpo receptor (BARBOSA, 2000).

As consequências do lançamento devem ser examinadas para que os gestores compreendam os danos. A capacidade dos resíduos da ETE de contaminar plantas, seres humanos e organismos aquáticos depende dos seguintes fatores: características da água bruta; produtos químicos utilizados nesses produtos e possíveis contaminantes; reações químicas que ocorrem no processo; métodos de remoção do lodo; tempo de residência do lodo; e propriedades biológicas da água (FRANCO, 2009).

5.6 Geossintéticos e o seu uso no deságue de resíduos sólidos

Dentre as principais funções do papel dos geossintéticos, destacam-se: filtração, pois permitem a passagem de fluidos com perda de solo limitada; drenagem, proporcionando a livre passagem de fluidos e separam diferentes materiais, evitando que se misturem; reforço, porque promovem aumentar a resistência do solo; encapsulamento, utilizando materiais como brita, concreto e areia; proteção, pois permitem a redistribuição de transmissão para o material a ser protegido de tensão/deformação e, de particular interesse neste estudo, é o escoamento de lodo das estações de tratamento de água.

O uso de geossintéticos é amplamente utilizado em diferentes projetos de engenharia ao redor do mundo. Como qualquer outro material de construção, eles devem ser projetados e especificados adequadamente para funcionar corretamente.

Os tubos geotêxteis podem ter vários tamanhos, dependendo de fatores como a quantidade de material a ser retido e a disponibilidade de espaço físico para reter o saco durante o desaguamento.

Através da utilização de técnicas de desaguamento por geotêxteis, o teor de umidade do material pode ser reduzido e conter contaminante que eventualmente possam estar presentes, em alguns casos apresentando melhor desempenho que as técnicas tradicionais, podendo também ser utilizado como um recurso de otimização do processo de desaguamento já empregado para tal fim (CASTRO, 2005).

Os tubos geotêxteis são usados para o desaguamento de materiais com alto teor de água e têm as vantagens de desaguamento rápido de grandes quantidades de resíduos, construção conveniente, processo conveniente, alta eficiência, baixo custo, economia de mão de obra e baixo impacto ambiental (FOWLER; DUKE; SCHMIDT; CRABTREE; BAGBY; TRAINER, 2002).

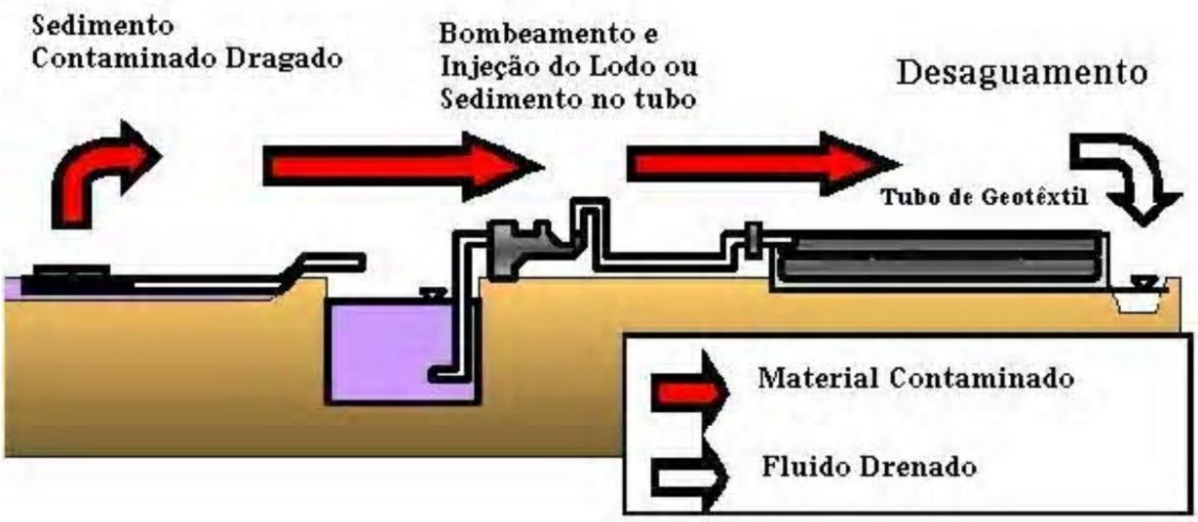
A utilização desses produtos para solucionar problemas ambientais tem recebido muita atenção das empresas que geram resíduos, principalmente aquelas que geram resíduos poluentes. A pesquisa sobre a estrutura da embalagem e garantia de estabilidade desses resíduos tem recebido cada vez mais atenção. O material geossintético mais utilizado para resolver tais problemas é o geotêxtil. Dependendo de suas propriedades, pode ser utilizado em sistemas de descarga, filtragem, contenção e desaguamento de resíduos (PIEPER, 2008).

O uso de tubos e bolsas de geotêxtil começou na década de 1970. Primeiramente, foi empregado para fins estruturais, principalmente para obras costeiras, e a partir da década de 1980, para conter sedimentos dragados. Esses tubos podem ser de vários tamanhos, dependendo

de fatores como a quantidade de material a ser retido e a disponibilidade de espaço físico para reter os tubos durante a desidratação.

O local para desaguamento deve ser determinado de acordo com a finalidade do sistema, por exemplo, se o fluido descartado é reutilizado, e deve ser selecionado e preparado de acordo com a natureza dos contaminantes presentes. Para um sistema eficaz de coleta da porção líquida, seja para descarte ou reutilização, deve ser previsto um pátio estanque para acomodar o tubo. Um esquema geral de montagem de ensaio de enchimento e deságue é usado no sentido de otimizar ao máximo a sequência do processo, desde o bombeamento do resíduo até o direcionamento do líquido coletado, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema geral de enchimento e desaguamento



Fonte: Mori; Mim e Tsiineoka (2002)

Fowler; Duke; Schmidt; Crabtree; Bagby e Trainer (2002) comentam que o ensaio em bolsas não deve ser utilizado para prever o comportamento da densificação porque o processo está diretamente relacionado ao efeito do próprio peso do material e do diâmetro do tubo.

Figura 5 - Tubo experimental preenchido até 1,5 m



Fonte: Fowler; Duke; Schmidt; Crabtree; Bagby e Trainer (2002)

5.7 Pesquisas desenvolvidas sobre a eficiência de desaguamento por tubos geotêxteis

Silveira; Kuroda; Abe; Yoshiaki e Hirooka (2015) avaliaram a eficiência de uma técnica de desaguamento natural para resíduos de decantadores de duas estações de tratamento de água diferentes usando um sistema de drenagem/secagem com manta geotêxtil em testes de laboratório e ensaios em pequena escala. De acordo com a Resolução Conama 357/05, durante a fase de drenagem, 78% a 91% do volume total de lixiviado é de qualidade que atende aos critérios de classificação para corpos de água doce Classe I e Classe II. Durante a etapa de secagem, mesmo em condições críticas de secagem, podem ser obtidos teores de sólidos totais de 15,9 a 20,3%, valores da mesma ordem de grandeza dos obtidos por desidratação mecânica.

O uso de geotêxteis para desaguar rejeitos de mineração, principalmente material de grão fino (lodo), conforme demonstrado por seus resultados e discussão, a utilização desses tubos em materiais geotêxteis é um resultado satisfatório, pois pode ser observado alto teor de sólidos em um curto período de tempo e sem a necessidade de aditivos químicos (MARTINS, 2006).

Segundo Castro (2005), sua pesquisa teve como objetivo analisar sistemas de desaguamento de lodo com ou sem contaminação por geotêxteis. Os geotêxteis têm sido

usados extensivamente desde o início da década de 1980 para conter materiais granulares, construir aterros e até mesmo prevenir barreiras de corrosão. Como material adjunto ou único em um sistema de desaguamento, suas dimensões estão ligadas às propriedades do material a ser desaguado, cujos resultados são amplificados com o uso de produtos químicos e biológicos antes e durante o processo de desaguamento. Castro (2005) também mencionou a importância da costura na fábrica para garantir um alto controle de qualidade.

Moo-Young; Gaffney e Mo (2002), com base em 26 testes de filtração sob pressão, investigaram o uso de tubos geotêxteis para desaguar lodos e sedimentos de alto teor na tentativa de avaliar sua viabilidade e possíveis fatores que os afetam. Os autores puderam observar que os tubos geotêxteis apresentaram melhores taxas de filtração para grandes quantidades de lodo. Além disso, não há dificuldade em reter o material particulado com o tubo de tecido.

Em relação às altas pressões de filtração, Moo-Young; Gaffney e Mo (2002) relataram que essas altas pressões tendiam a ter um efeito positivo nas taxas de desaguamento, mas no final das contas não tiveram um efeito significativo em altas concentrações de sólidos porque interfeririam na formação da torta de filtro e nos consequentes fatores de controle de retenção de material granular fino.

A taxa de desaguamento e a eficiência de desaguamento, que podem ser usadas como parâmetros para avaliar a capacidade dos geotêxteis, são afetadas por vários fatores principais do lodo produzido e do tipo de material geotêxtil utilizado (MOO-YOUNG; GAFFNEY; MO, 2002).

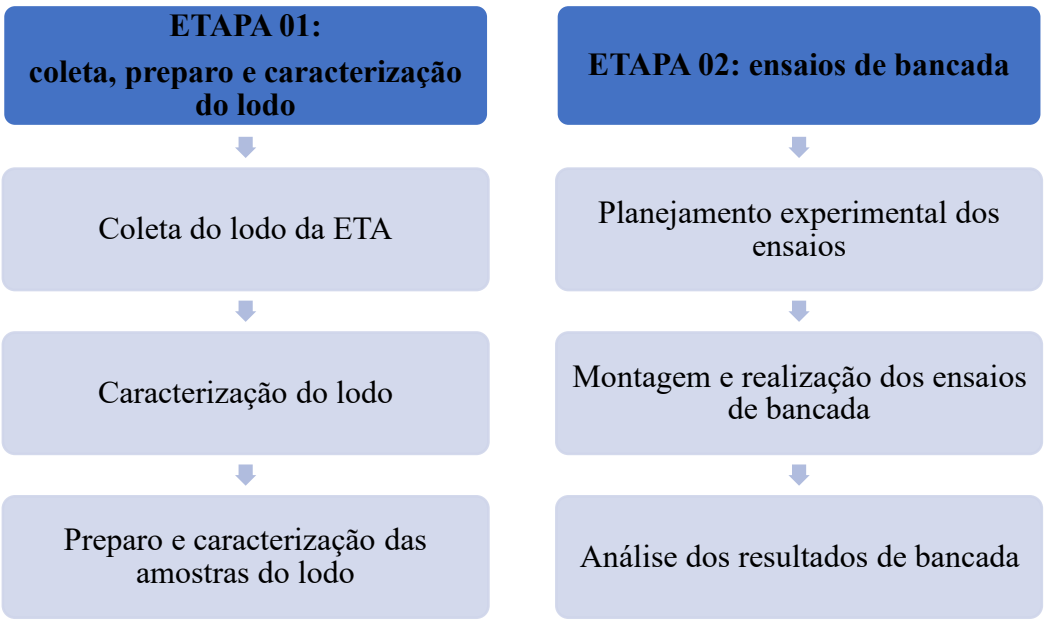
Worley; Bass e Vendrell (2007) avaliaram o processo de desaguamento de geotêxteis com o auxílio de coagulantes (sulfato de alumínio) e polímeros. O uso de compostos facilita a separação sólido-líquido, reduzindo o tempo necessário para o enchimento dos tubos e o processo de desidratação. Foi observado também a retenção, como consequência da aplicação dos condicionantes químicos, de fósforo e nitrogênio orgânico na fração sólida, e o carreamento pela fração líquida de nitrogênio amônio e potássio.

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa é de natureza quali-quantitativa, combinando dados qualitativos e quantitativos em uma mesma pesquisa, considerando que ambos os métodos apresentam pontos fortes e fracos que podem ser complementados.

Este capítulo objetivou definir a metodologia que foi utilizada na pesquisa, e indica as ferramentas utilizadas na realização e análise dos resultados. A metodologia se apresenta basicamente em duas (2) etapas (Figura 6). A 1ª etapa consiste na coleta, preparo e caracterização do lodo gerado na estação de tratamento de água. Por fim, a 2ª etapa consistirá na realização do planejamento experimental para o ensaio de bancada de desaguamento do lodo através da filtração por gravidade em tecido geotêxtil, execução do ensaio e avaliação dos resultados obtidos.

Figura 6 - Fluxograma de procedimentos



Fonte: Autor (2022)

6.1 Coleta e caracterização do lodo

A coleta ocorreu em duas fases. A primeira etapa envolveu a coleta do lodo do tubo de descarga do decantador e posterior armazenamento. A segunda etapa envolveu a coleta de material sobrenadante.

O lodo coletado da ETA foi disponibilizado pela companhia de saneamento da região Norte do país. A ETA em questão possui unidades de coagulação, floculação, decantação e filtração e é descrita como uma ETA de ciclo completo com vazão média de 700 L/s. A coleta de lodo ocorreu no primeiro semestre de 2022, durante o qual foram recolhidas amostras de lodo presentes no tanque de equalização da respectiva estação de tratamento. A presença do lodo da ETA no tanque de equalização se deu pela presença das características dos lodos oriundos das duas principais fases de geração de lodo em uma estação de tratamento de água de ciclo completo, os decantadores e a água de lavagem dos filtros. A partir desta coleta, um volume suficiente de "lodo de matriz" (ver Figura 7) foi obtido para a realização dos ensaios.

A coleta de lodo do tanque de equalização iniciou-se na entrada da passarela, em seguida o balde coletor é abaixado com o auxílio de uma corda para coletar um volume de lodo de cerca de 25 L, e o processo se repetiu até que um volume aproximado de substrato de 1000 L de lodo é obtido. Após repouso por 24 horas, parte do sobrenadante foi drenado de modo que o “Lodo Matriz” obtivesse concentração de SST próximo de 35 g/L.

Figura 7 - Lodo matriz coletado e armazenado em barris



Fonte: Autor (2022)

Após a fase de coleta, foram preparadas duas Concentrações de Lodo de Estudo (CLE) (ver Figura 8), a CLE 01 de 2,5 g/L e a CLE 02 de 18,5 g/L. A preparação e caracterização do lodo foram realizadas no laboratório de análise de água do IFTO. A caracterização incluiu a análise das propriedades físicas, químicas e microbiológicas do lodo. Após a preparação, o ensaio de Sólidos Suspensos Totais foi realizado para verificar se a concentração está dentro dos valores determinados.

Figura 8 - Preparo das concentrações de lodo definidas



Fonte: Autor (2022)

6.2 Planejamento experimental e ensaios de bancada

Para realização dos ensaios de bancada, a parametrização foi empregada de acordo com o método descrito em ALPHA (2017). A Tabela 1 abaixo lista os parâmetros físico-químicos utilizados, juntamente com suas unidades de medida, metodologia de ensaio e limites de detecção.

Tabela 1 - Parâmetros, métodos e limites de medição

Parâmetro	Unidades	Método	Limite de detecção
Alumínio	mg/L Al	EAA-Forno de grafite	0.001
Alcalinidade	mg/L $CaCO_3$	Titrimétrico	1
Carbono orgânico total	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo	0.1
Carbono orgânico dissolvido	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo	0.1
Ferro	mg/L Fe	EAA - Chama	0.01
Manganês	mg/L Ma	EAA - Chama	0.001
pH	Adimensional	Potenciométrico	0.01
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1

Antes dos testes de bancada, foi realizado um planejamento experimental para determinar a melhor ferramenta estatística visando à otimização dos ensaios e resultados.

Nesta etapa, um método conhecido como *Response Surface Methodology* (RSM) é por meio do Delineamento de Face Centrada (DFC). Ao otimizar os resultados, o DFC buscou auxiliar a avaliar o impacto dos parâmetros: tipo de condicionante químico, dosagem do condicionante químico e a concentração inicial de SST no processo de desaguamento do lodo de ETA.

Foram inseridos os parâmetros de dosagem do condicionante químico e a concentração inicial de SST do lodo através do software *Protimiza Experimental Design,* que utiliza abordagem numérica quantitativa para as variáveis independentes. O tipo de parâmetro de condicionante químico é qualitativo e não é possível utilizá-lo via DFC.

Assim, definiu-se a utilização de duas variáveis independentes, suas condições experimentais e seus níveis reais e codificados, conforme Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Condições experimentais das variáveis independentes

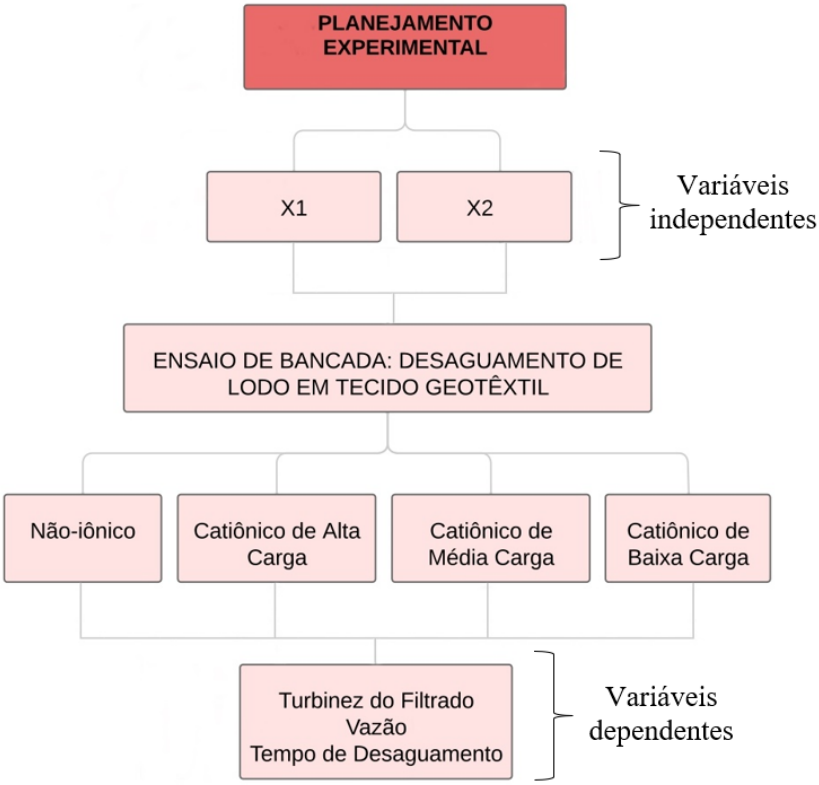
Variável quantitativa	**Código da variável**	**Níveis**		
		-1	**0**	**+1**
SST inicial do lodo (g/L)	X_1	2,5	10,50	18,50
Dosagem do polímero (mgPol/gSST)	X_2	1,5	3,75	6,00

Fonte: Autor (2022)

Os valores máximos (+1) e médios (0) da variável X_1 (SST inicial do lodo) buscou simular as características do lodo nas etapas de descarga dos decantadores e tanque de equalização, respectivamente. O valor mínimo (-1) buscou simular as características do lodo da etapa de lavagem dos filtros. Por fim, quanto aos valores definidos na variável X_2 (dosagem do polímero), estes são baseados na literatura.

Definidas as variáveis independentes (X_1 e X_2), buscou-se obter os valores para as variáveis dependentes (Y), definida segundo a NBR NBR 14.653-2 como uma variável cujo comportamento é explicado pelas variáveis independentes. A Figura 9 abaixo traz uma representação esquemática do projeto experimental, levando em consideração as variáveis de entrada (independentes) e resposta (dependentes).

Figura 9 - Fluxograma do planejamento experimental



Fonte: Autor (2022)

O ensaio de desaguamento de lodo por gravidade foi dividido em quatro rodadas de 11 ensaios, totalizando 44 ensaios, e cada rodada utilizou polímeros com características diferentes conforme descrito na Tabela 3 abaixo. Na Tabela 4 é possível visualizar o planejamento dos ensaios realizados para o DFC para cada polímero ensaiado

Tabela 3 - Produtos químicos utilizados como condicionantes químicos

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	Média	800

Fonte: Matryx (2021)

Tabela 4 - Delineamento de Face Centrada para os ensaios de bancada em tecido geotêxtil

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

Fonte: Autor (2022)

As características físicas do geotêxtil tipo GT1 do fabricante Huesker, utilizado para testes de gravidade e bancada pressurizada, definido através do planejamento experimental, estão descritas na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Propriedades físicas dos geotêxtil ensaiado

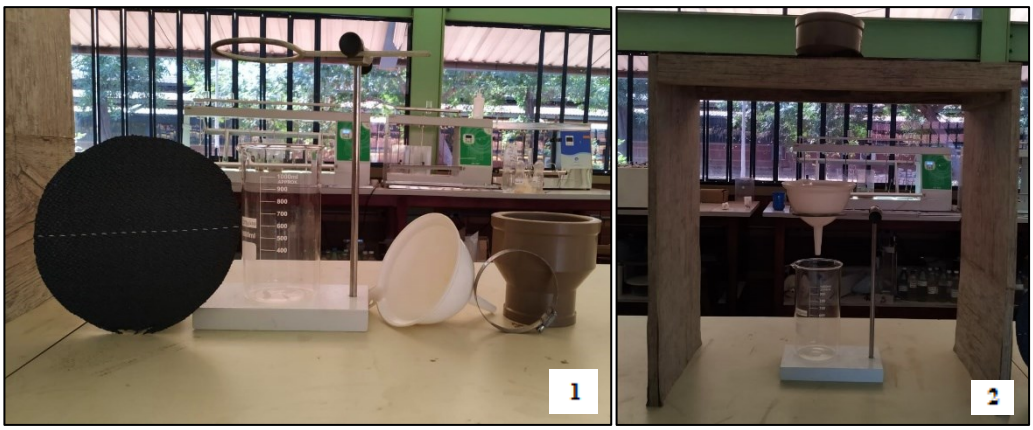
Propriedades	**Geotêxtil 1 (GT1):** **PP 105/105 DW**
Matéria-prima	Polipropileno
Massa por unidade de área (EN ISO 9864)	445 g/m²
Resistência a tração nominal (EN ISO 10.319)	≥ 105 kN/m
Deformação na Resistência Nominal (EN ISO 10.319)	≤ 9%
Permeabilidade (EN ISO 11.058)	25.10^{-3} m/s
Tamanho da abertura (NBR 12.956)	200 µm

Fonte: Huesker (2021)

O sistema de filtração geotêxtil consiste em um conjunto de equipamentos de baixo custo e fácil utilização. Para isso, serão necessários os seguintes equipamentos: redução de

75x50 mm em PVC, abraçadeira metálica, filtro geotêxtil (GT1), funil, becker graduado de vidro, suporte universal com anel para funil e suporte de madeira, conforme Figura 10.

Figura 10 - 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)

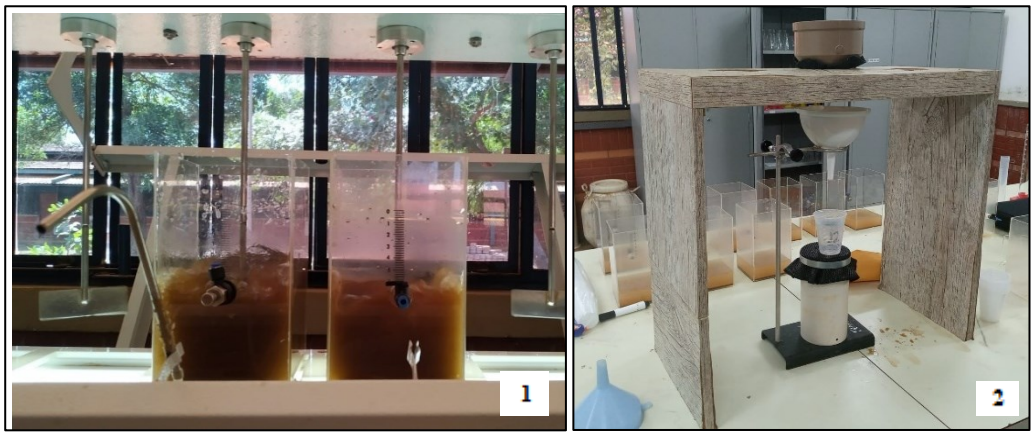


Fonte: Autor (2022)

Os ensaios de bancada foram realizados de acordo com o método descrito por Miratech (2005) e Lawson (2006), que buscou quantificar a porcentagem de fração sólida retida em filtros geotêxteis e a qualidade do material filtrado. Para isso, foi realizado os seguintes procedimentos (ver Figura 11):

- Homogeneizar o lodo na concentração desejada de acordo com o planejamento experimental, retirar dele uma amostra de 500 ml e colocar 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 duração de 120 segundos conforme definido por Souza (2022);
- Após a mistura no *jar test* as amostras foram filtradas usando no equipamento de bancada com filtro geotêxtil GT1 e o volume foi registrado a cada 10 segundos durante o teste. O término de cada ensaio ficou condicionado conforme proposto por Souza (2022), da qual se deu após 15 segundos de intervalo entre as gotas;
- Finalmente, as contagens de volume são realizadas para cada teste e o valor de turbidez do filtrado composto é registrado.

Figura 11 - Ensaio de bancada: agitação do lodo com adição de polímero (1), equipamento de filtração em bancada durante desaguamento do lodo floculado (2)



Fonte: Autor (2022)

Uma abordagem de superfície de resposta foi usada para validar estatisticamente o efeito das variáveis SST iniciais de lodo e dosagem de polímero no desempenho do teste de filtração por gravidade. Para o tratamento estatístico das variáveis reposta gerados, a significância de cada variável dependente foi analisada por meio do software *Protimiza Experimental Deisgn*, identificada como *p-value*. A partir da existência de significância estatística, foi criado um modelo matemático relacionando a variável independente com a variável dependente, verificando a adequação dos valores preditos vs. observados, e com base nisso foi gerado um gráfico de superfície de resposta para cada índice de desempenho.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 6 abaixo mostra os resultados das análises físico-químicas para o "Lodo Matriz" e duas amostras com concentrações de 2,5 e 18,5 g/L, respectivamente.

Tabela 6 - Resultados da Caracterização físico-química dos lodos de estudo

Parâmetro	Lodo Matriz	CLE 01 (2,50 g/L)	CLE 02 (18.50 g/L)
Alcalinidade (mg/L $CaCO_3$)	14	18	17
COD (mg/ L C)	8,442	8,474	7,821
COT (mg/ L C)	246	532	85
Manganês (mg/ L Mn)	29,36	4,43	0,94
pH	6,44	6,65	6,86
SST (mg/ L)	46782	8006	2492
ST (mg/ L)	46910	8136	2580
STD (mg/ L)	128	130	88
Ferro (mg/L Fe)	17964	2777	1025
Alumínio (mg/L Al)	0,16	0,34	0,2

Fonte: Autor (2022)

O delineamento composto de face centrada (DCFC) foi usado em conjunto com a ANOVA para otimizar o desaguamento do lodo no respectivo ETA e a adequação do modelo matemático. Duas variáveis foram consideradas neste modelo, a primeira relacionada à concentração inicial de SST (X_1) e a segunda relacionada à dosagem do polímero (X_2). Com os resultados das variáveis X_1 e X_2, foi possível calcular os coeficientes de regressão e construir um modelo matemático para as variáveis de resposta: tempo de desaguamento e a turbidez do filtrado.

Utilizando significância estatística de 90% de confiança (*p-value* $\leq$ 0.10), foram elaborados 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 vistos nas Tabelas 7, 8, 9 e 10 abaixo.

Nestas tabelas, também é possível observar o tratamento estatístico dos resultados de turbidez do filtrado e tempo de desaguamento para os quatro condicionadores químicos utilizados. Vale ressaltar 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 ao nível de confiança de 90%.

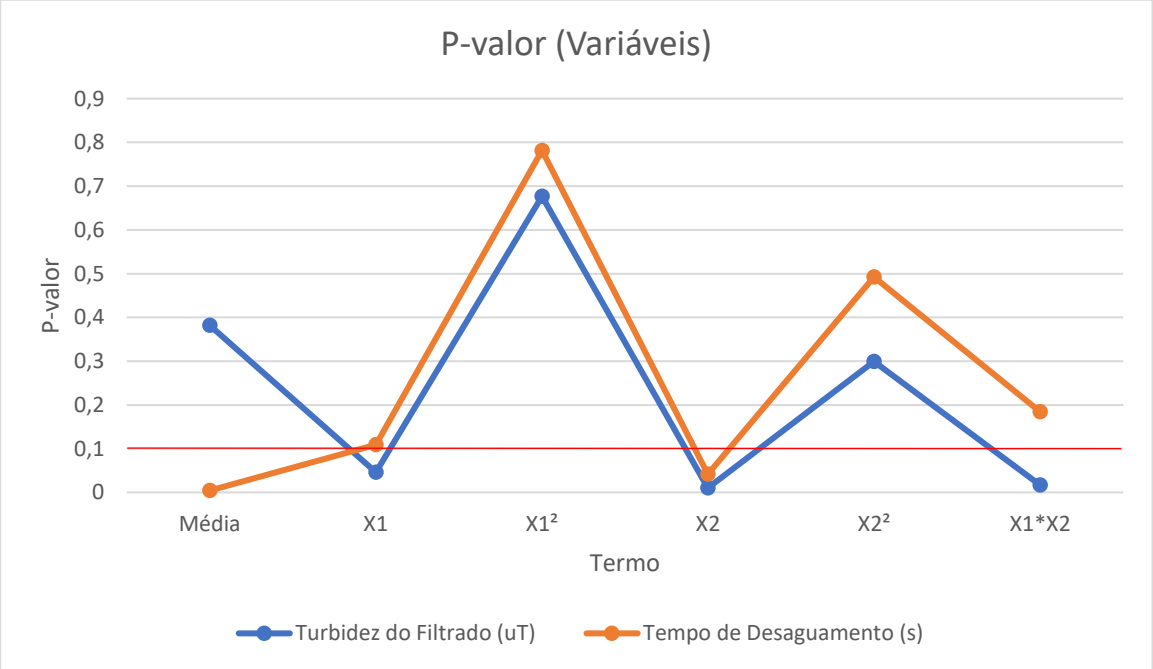
Tabela 7 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9080-X

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 (2022)

A fim de simplificar a interpretação, o Gráfico 1 abaixo, fez-se necessário para visualizar os dados do P-valor para o polímero catiônico 9080-X.

Gráfico 1 - P-valor para o polímero catiônico 9080-X



Fonte: Autor (2022)

No Gráfico 1, referente ao polímero catiônico 9080-X, pode-se observar que os termos quadráticos X_1^2 e X_2^2 e a média não apresentaram significância estatística abaixo de 0,100 (p-valor < 0,100) para a variável turbidez. Em relação ao tempo de desaguamento, os termos quadráticos X_1^2 e X_2^2, o termo linear X_1 e a interação entre as variáveis X_1*X_2 não foram estatisticamente significativos.

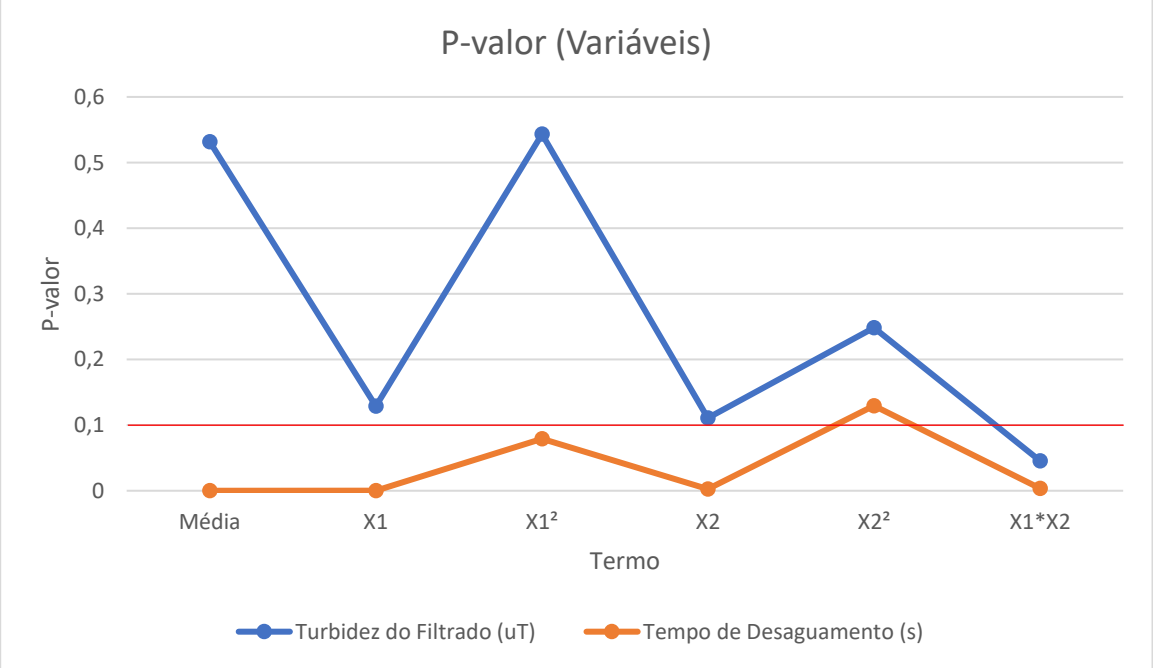
Tabela 8 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9040-X

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 (2022)

O Gráfico 2 abaixo, representa os dados do P-valor para o polímero catiônico 9040-X.

Gráfico 2 - P-valor para o polímero catiônico 9040-X



Fonte: Autor (2022)

No Gráfico 2, referente ao polímero catiônico 9040-X, pode-se observar que apenas a interação entre as variáveis X_1*X_2 apresentou significância estatística abaixo de 0,100 (p-valor < 0,100) para a variável turbidez. Para o tempo de desaguamento, o termo quadrático X_2^2 não foi estatisticamente significativo.

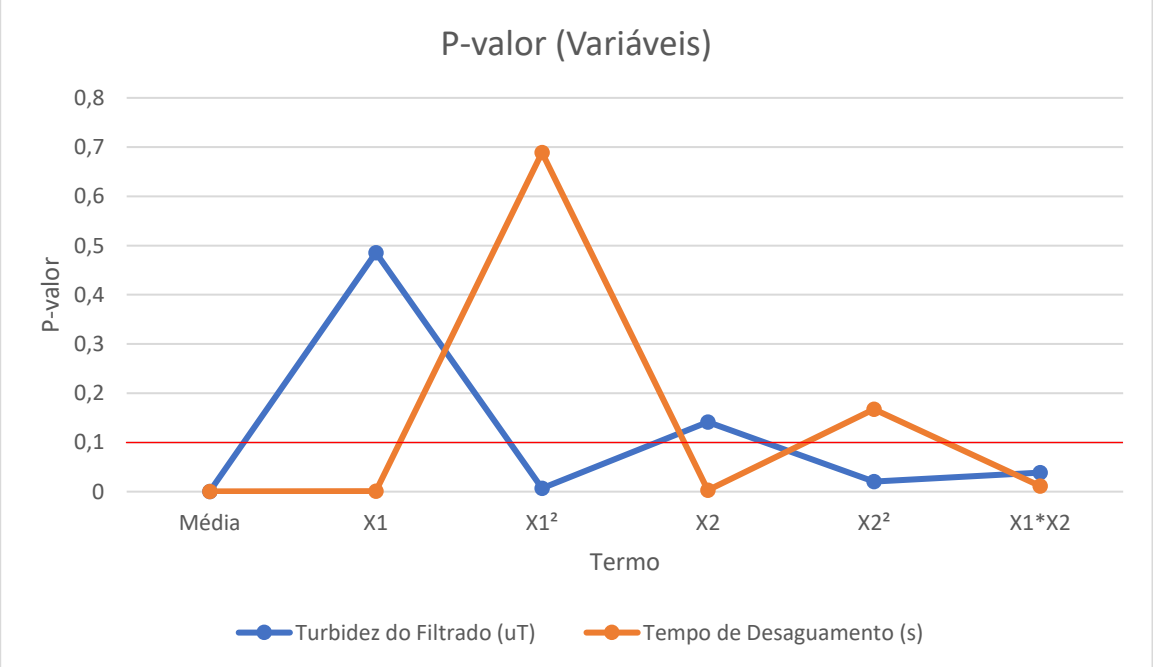
Tabela 9 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 9020-X

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 (2022)

O Gráfico 3 abaixo, representa os dados do P-valor para o polímero catiônico 9020-X.

Gráfico 3 - P-valor para o polímero catiônico 9020-X



Fonte: Autor (2022)

No Gráfico 3, referente ao polímero catiônico 9020-X, pode-se observar que os termos lineares X_1 e X_2 não apresentaram significância estatística abaixo de 0,100 para a variável turbidez. Em relação ao tempo de desaguamento, os termos quadráticos X_1^2 e X_2^2 não foram estatisticamente significativos.

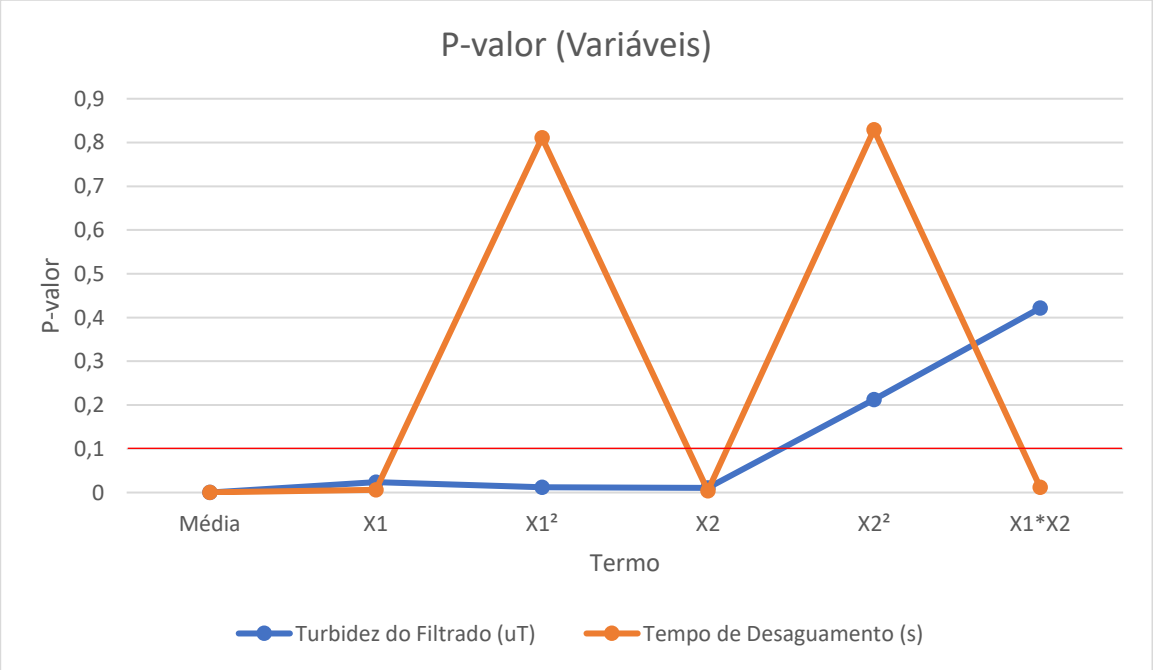
Tabela 10 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o polímero catiônico 3001-X

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 (2022)

O Gráfico 4 abaixo, representa os dados do P-valor para o polímero catiônico 3001-X.

Gráfico 4 - P-valor para o polímero catiônico 3001-X



Fonte: Autor (2022)

Por fim, no Gráfico 4, referente ao polímero não-iônico 3001-X, pode-se observar que o termo quadrático X_2^2 e a interação entre as variáveis X_1*X_2 não apresentaram significância estatística abaixo de 0,100 (p-valor < 0,100) para a variável turbidez. Em relação ao tempo de desaguamento, os termos quadráticos X_1^2 e X_2^2 não foram estatisticamente significativos.

Na Tabela 11 abaixo, é possível visualizar os resultados da matriz dos ensaios otimizados com os valores reais (indicados entre parênteses) e valores codificados, bem como os resultados das variáveis resposta, também conhecidas como variáveis dependentes, para cada polímero ensaiado. A Tabela 12 descreve a equação de regressão para cada polímero usado, os valores F calculado e F tabelado, a porcentagem de variância explicada e o p-valor da equação de regressão.

Os resultados apresentados nas Tabelas 11 e 12 a seguir, mostram que o polímero não-iônico de baixa carga foi o mais indicado para o tratamento do lodo da ETA, pois apresentou os melhores resultados em termos de porcentagem da variância (R^2) para tempo de desidratação, turbidez do filtrado e vazão do filtrado.

Tabela 11 - 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

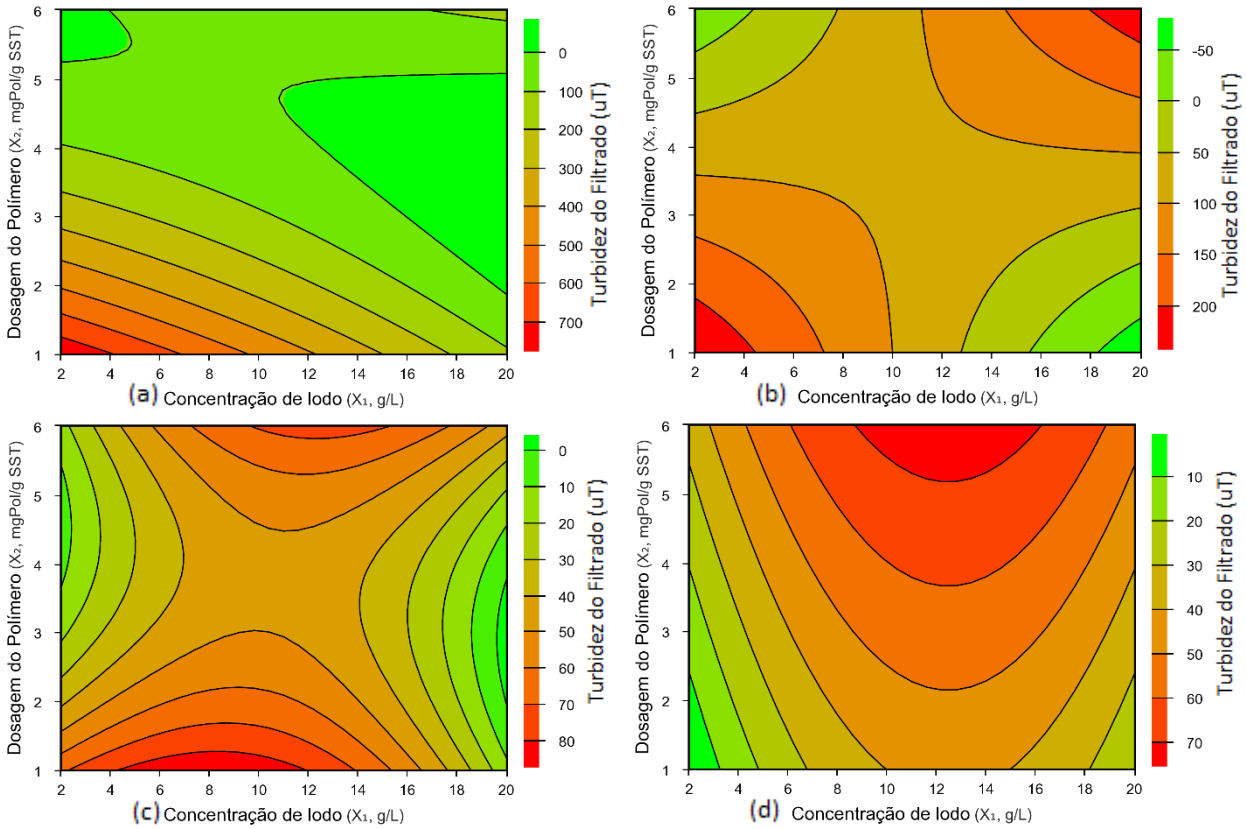
Fonte: Autor (2022)

Tabela 12 - 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)

Turbidez do filtrado						
Polímeros		Equação de regressão	Fcalc	Ftab	R² (%)	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	R² (%)	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 (2022)

Figura 12 - 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 (2022)

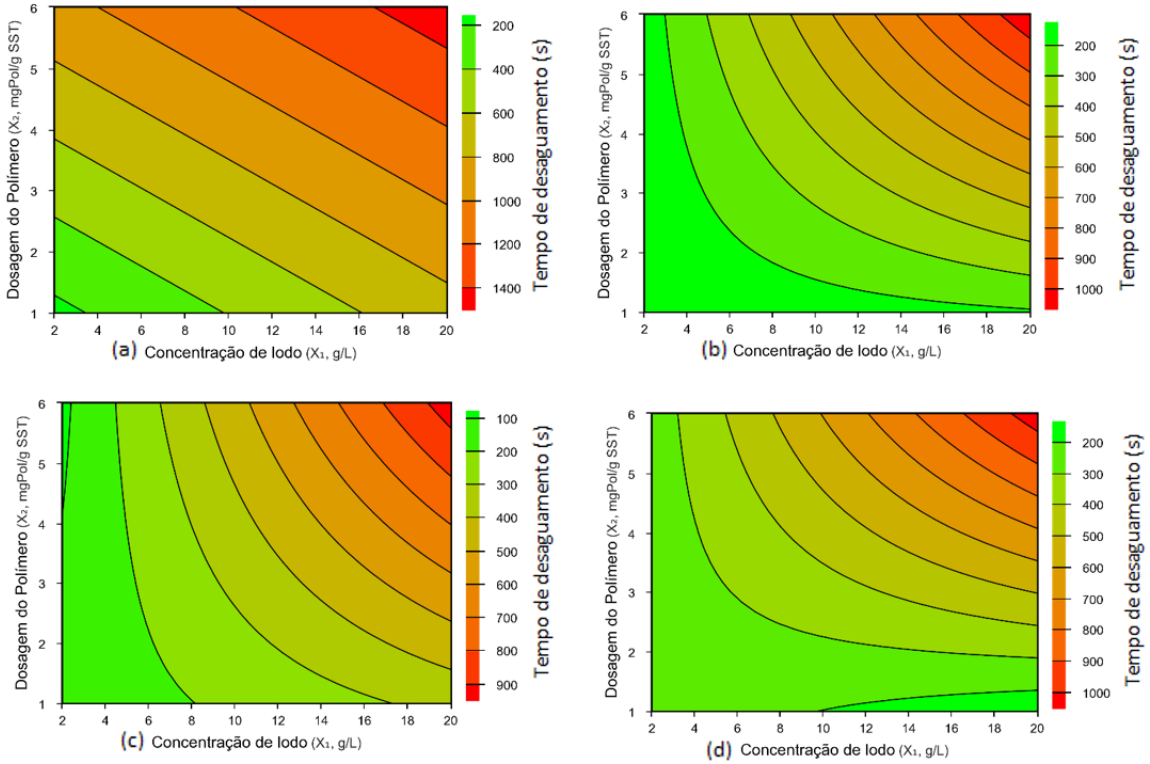
Na Figura 12 (a), pode-se observar que o polímero catiônico 9080-X apresenta efetiva remoção de turbidez, atingindo valores mínimos de 2,54 uT e valores máximos de 417,33 uT para uma dosagem de 1,5 mgPol/gSST, indicando a ausência ou ineficácia do *filter cake* no filtro geotêxtil. Analisando a Figura 12 (a), destaca-se a influência da dosagem do polímero e da concentração do lodo, onde a turbidez do clarificado tende a ser mais efetiva quanto maior a concentração do lodo, ao passo que quanto maior a dosagem, melhor tendem os valores de turbidez. No entanto, em altas concentrações de polímero e baixas concentrações de lodo, a eficiência da turbidez do filtrado tende a ser pior devido à maior viscosidade e opacidade do material filtrado.

O polímero catiônico 9040-X visualizado na Figura 12 (b) não apresenta estatística significativa para o nível de significância de *p value* = 0,05, possuindo seu valor de $F_{calculado} > F_{tabelado}$, portanto seus resultados são consistentes com a hipótese nula proposta pelo teste da ANOVA.

O polímero catiônico 9020-X, conforme na Figura 12 (c), apresentou melhores valores de turbidez perto de ambas as extremidades das concentrações de lodo inferior e superior para as melhores faixas de dosagem de polímero, sua correlação com a concentração se deu de maneira inversamente proporcional, onde quanto menor a concentração do lodo, maior a dosagem necessária para alta clarificação do lodo e, portanto, quanto maior a concentração do lodo, menor a dosagem de polímero necessária.

Figura 12 (d), apresentou resultados para o polímero não-iônico 3001-X mostrando menor variabilidade de turbidez, com uma turbidez do filtrado mínima de 16,2 uT e máxima de 77,9 uT para concentrações de polímero de 1,5 e 6,0 mgPol/gSST. Ao analisar a Figura 12 (d), pode-se observar que a menor faixa de turbidez do filtrado ocorre em menor dosagem de polímero e em baixas (< 10 g;L) ou altas (> 14 g/L) concentrações de turbidez.

Figura 13 - 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 (2022)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação aos ensaios de bancada de geotêxteis, a filtração em material geotêxtil é uma tecnologia de desaguamento adequada para desidratação de lodo de ETA devido às suas propriedades físicas e hidráulicas e baixos custos operacionais em comparação com outras tecnologias de desaguamento. A utilização de sistemas de tratamento de resíduos gerados na ETA é fundamental, pois é uma alternativa para minimizar o impacto ambiental do lançamento direto de lodo em corpos hídricos.

É possível identificar que a concentração inicial de SST, bem como a dosagem do condicionante químico, polímeros não-iônicos, têm um efeito direto na retenção da fração sólida no geotêxtil e no tempo de desaguamento do filtrado.

A Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) provou ser uma ferramenta eficaz para auxiliar no planejamento de experimentos e na validação estatística dos resultados obtidos por meio de ensaios de bancada.

Os resultados do planejamento experimental mostraram que tanto o polímero catiônico 9080-X quanto o polímero não-iônico 3001-X deram os melhores resultados para a turbidez do filtrado, no entanto, com relação à combinação de tempo de desaguamento e turbidez do filtrado, apenas o polímero não-iônico apresentou resultados satisfatórios.

A utilização de polímeros no tratamento de resíduos é fundamental, pois promovem uma floculação mais eficiente, otimizam o desaguamento do lodo fazendo com que os sólidos fiquem retidos com mais facilidade nos filtros.

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar o efeito da dosagem do condicionante químico no sistema de desaguamento em geotêxtil por gravidade, onde altas concentrações podem prejudicar a turbidez do filtrado e ocasionar a colmatação prematura do tecido geotêxtil sem que haja um desaguamento eficiente.

Recomenda-se que sejam feitas análises físico-financeira quanto ao sistema de tratamento, obtendo assim as dimensões adequadas para o volume previsto de resíduo da ETA.

REFERÊNCIAS

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004 - Resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Leito de drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água**. 2008. Artigo Técnico - Engenharia Sanitária e Ambiental vol.13 no.1 Rio de Janeiro Jan./Mar. 2008.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S.; **Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro**. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro: [s.n.], v.18, p. 115-122, 2013.

ANDREOLI, C. V. (coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES / RiMa, v. 2, p. 119-142, 2001, 257 p.

ASSIS, Letícia Rodrigues de. **Avaliação do Impacto em Corpos D'água Devido ao Lançamento de Resíduos de Tratamento de Água de Juiz de Fora- MG**. 2014. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.

AWWA/APHA/WEF. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**, 1989.

BARBOSA, R. M. **A toxicidade de despejos de estações de tratamento de água à Daphnia similis (Cladocera, Crustácea)**. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 27., Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: 2000.

BELLAVER, E. H.; SANTOS, Z. M. Q. Impacto do crescimento populacional sobre recursos finitos. **Extensão em Foco**. ISSN 2317-9791, [s.l.], v. 6, n. 1, 2019. Disponível em: https://45.238.172.12/index.php/extensao/article/view/1975. Acesso em: 06 set. 2022.

BRASIL. **LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 1997.

BRASIL. Ministério da Saúde (2004) Portaria n.º 518, de 25 de março de 2004 do. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Republicada In: Diário Oficial da União, Brasília, n. 59, Seção 1, p. 266, 26/03/2004.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 mai. 2021, seção 1, ed.58, p. 127

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

CESAN- COMPANHIA ESPIRITO SANTENSE DE SANEAMENTO. **Apostila: Tratamento de Água**. Vila Velha, 2013.

CORDEIRO, J.S. (2001). **Processamento de lodos de Estações de Tratameento de Água (ETAs)**. In.: ANDREOLI, C.V. et al. (2001). Coord. Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB.

DE DEUS, A.B.S. (1996). **Codisposição de resíduos domésticos e industriais perigosos**. Porto Alegre, IPH/UFRGS. 26f.

DIAS, L. M. **Alternativa de destinação final do lodo de estação de tratamento de água, fabricação de blocos cerâmicos**. AIDIS. Ago. 2004, p.1-23.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos: RiMA, 2005. 1565 p.

DI BERNARDO, Luiz; PAZ, Lyda Patrícia Sabogal. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. 1 ed. São Carlos: LDiBe Ltda, 2008.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: Editora LDiBe, 2012. 540 p.

ENGEVISTA: Classificação dos Lodos Formados Durante o Processo de Coagulação/Floculação da Água com Coagulantes PAC E Moringa Oleifera. Maringá: Universidade Estadual de Maringa, v. 14, n. 3, dez. 2012.

FERREIRA, S.S; SOBRINHO P. A. **Considerações sobre o tratamento de lodos de estações de água**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, 1998.

FONTANA, Antônio Osmar. **Sistema de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de lodo de decantador e reuso de água de lavagem de filtros: estudo de caso – ETA Cardoso**. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2004.

FRANCO, E. S. **Avaliação da influência dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico na remoção de turbidez e cor da água bruta e sua relação com sólidos na geração de lodo em estações de tratamento de água**. 2009. 210 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

FREITAS, J. G.; BRINK, N. C. P.; FILHO, S. S. F. **Análise do comportamento da etapa de condicionamento e desidratação de lodos de ETAs e ETEs mediante a execução de ensaios de resistência específica e tempo de filtração**. In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Campo Grande. Anais, 2005.

FOWLER, J.; DUKE, M.; SCHMIDT, M. L.; CRABTREE, B.; BAGBY, R. M.; TRAINER, E. **Dewatering sewage sludge and hazardous with geotextile tubes.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002. Nice. Anais […]. France: Nice, 2002, p. 1007-1012.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JUNIOR, A. D. **Desidratação de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Água.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17., 1993, Natal. Anais [...]. Natal: ABES, 1993. v.2, p. 324-341.

GUANAES, E. A. **Análise laboratorial do desaguamento do lodo residual de estação de tratamento de água por meio de geossintéticos**. 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

Haak, W. **Condicionamento químico de lodo de estação de tratamento de água com monitoramento através de potencial**. 2011. 235 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

HOPPEN, C. **Estudo de dosagem para incorporação do lodo de eta em matriz de concreto, como forma de disposição final**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005. 9p.

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

MARTINS, P. M. **Utilização de tubos geotêxteis para desaguamento de rejeitos de mineração**. Dissertação (mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006. 161p.

MIKI, Marcelo Kenji; ALEM SOBRINHO, Pedro; VAN HAANDEL, Adrianus Cornélio**. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento, mecanizado e secagem térmica do lodo**. In: Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Inspeção sanitária em abastecimento de água para consumo humano**. Disponível em < https://pt.slideshare.net/SESMG/inspeo-sanitria-mdulo-ii-maio-2013>. Acesso em 28 de outubro de 2022.

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.

MORI, H.; MIM, H. E.; TSIINEOKA, N. **The use of geo-tube method to retard the migration of contaminants in dredge soil**. GEOSYNTHETICS - 7 TH ICG, 2002, Nice. Anais… 2002. p. 1017-1020.

MORITA, Dioni Mari. **Usos Benéficos de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PEREIRA, S. L. de M. **Características físicas, químicas e microbiológicas do lodo das lagoas da ETA Gramame**. 2011. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2011.

PIEPER, K. M. C. **Avaliação do uso de geossintético para o deságue e geocontenção de resíduos sólidos de estação de tratamento de água**. 2008. 160 f. Dissertação (Mestrad) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de engenharia, Porto Alegre, 2008.

PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; SALES, A.; BARON, O. **Caraterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba – PR**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL, 22., 2003. Anais [...]. Joinvile, 2003.

REALI, M. A. P. et al. **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. ABES/PROSAB. Rio de Janeiro. 1999.240p.

SAMPAIO, D. V. **DESIDRATAÇÃO DE LODO PROVENIENTE DE ETA ATRAVÉS DE TUBOS GEOTEXTEIS**. 2011. 61f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

SILVEIRA, C; KURODA, E. K.; ABE, C.H.; YOSHIAKI, L.; HIROOKA, E. Y. **Desaguamento do lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem/secagem. Engenharia Sanitária e Ambiental (Online)**, v. 20, p. 297-306, 2015.

SOUZA, M. B. **Estudo do lodo gerado na estação de tratamento de água de Buíque – PE : caracterização, quantificação e identificação de oportunidades de minimização dos resíduos**. 2009. 145 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-Graduação em Química, Pró-Reitoria de PósGraduação e Pesquisa, São Cristóvão, 2009.

TOMINAGA, E. **Análise dos procedimentos para avaliação de desempenho de sistemas fechados de geotêxtil para desaguamento**. 2010.

UNESCO World Water Assessment Programme. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos 2020: Água e mudança climática.**
UNIC. CENTRO DE INFORMAÇÕES DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **População mundial: A ONU e a população mundial**. Rio de Janeiro: [s.n.], p. 1, 2019. Disponível em: https://unicrio.org.br/acao/populacao-mundial/. Acesso em: 25 set. 2022.

URASHIMA, D. C., **Simulação do Processo de Retenção de Partículas por Filtros Têxteis**. 2002. 100f. Tese (Doutorado) - Intituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, 2002.

VAN SANTVOORT, G. **Geotextiles and geomembranes in civil engineering**. 1994. p.517. A.A. Balkeman.Roterdam, Netherland.

VIANNA, M. R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 3ª edição, Editora Imprimatura, Belo Horizonte, MG. 1997. 576p.

VIDAL, D. **Aplicações Especiais de Geossintéticos**. In: 40 SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS. Porto Alegre, 2003.

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.