



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

LAÍS SOUZA PEDRAL DE SÁ

**AVALIAÇÃO DE SISTEMA PRESSURIZADO EM TUBO GEOTÊXTIL NO
DESAGUAMENTO DE RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA**

**PALMAS
2019**

LAÍS SOUZA PEDRAL DE SÁ

**AVALIAÇÃO DE SISTEMA PRESSURIZADO EM TUBO GEOTÊXTIL NO
DESAGUAMENTO DE RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial 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

2019

Sá, Laís Souza Pedral de

Avaliação de sistema pressurizado em tubo geotêxtil no desaguamento de resíduos gerados no tratamento de água/ Laís Souza Pedral de Sá. – Palmas, 2019.

76 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – Campus Palmas, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva

1. Desaguamento 2. Tubo Geotêxtil 3. Resíduos de ETA 4. Condicionamento químico 5. Planejamento Experimental

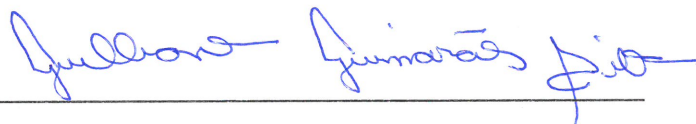
LAÍS SOUZA PEDRAL DE SÁ

**AVALIAÇÃO DE SISTEMA PRESSURIZADO EM TUBO GEOTÊXTIL
NO DESAGUAMENTO DE RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO
DE ÁGUA**

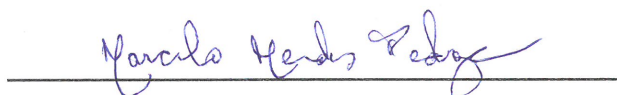
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do curso de
Engenharia Civil Instituto Federal do
Tocantins - Campus Palmas, como exigência
à obtenção do grau em Engenheiro Civil.

Aprovado em: 01 / 07 / 2019

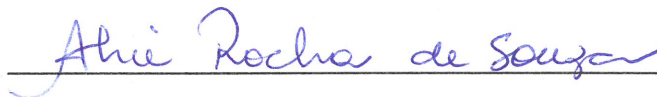
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Giuliano Guimarães Silva (Orientador)
IFTO – Campus Palmas



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
IFTO – Campus Palmas



Prof.^a Dra. Alice Rocha de Souza
IFTO – Campus Palmas

Dedico este trabalho à minha
amada mãe.

RESUMO

Os resíduos das ETAs de ciclo completo são gerados a partir de operações de coagulação/floculação e removidos nas etapas de decantação e filtração, com o objetivo de clarificar a água bruta. Esses resíduos causam impactos ambientais quando descartados indevidamente em corpos hídricos sem tratamento. Em geral, possuem baixa concentração de sólidos e difícil desidratação, sendo necessárias as etapas de adensamento e desaguamento para seu descarte adequado. O geotêxtil tem se mostrado um método eficiente e viável nesta etapa, sob perspectiva técnica, econômica e ambiental. Buscando auxiliar no estudo de parâmetros de projeto a serem adotados em sistemas de tratamento de resíduos, este trabalho avaliou o método de desaguamento de resíduos de ETAs utilizando geotêxtil, por meio de ensaios pressurizados, simulando o funcionamento de *bags*. Foram preparados três resíduos de estudo, com diferentes teores de sólidos suspensos totais (SST), e testados três polímeros sintéticos (catiônico, aniônico e não-iônico) com diferentes dosagens. Para otimizar e maximizar rendimento dos experimentos foi utilizado o Planejamento Estatístico Experimental. Os resultados mostraram que o SST inicial do resíduo e a dosagem e tipo de condicionante químico exercem influência na qualidade do filtrado e no tempo de desaguamento, sendo o polímero catiônico o que apresentou maior efeito estatístico para as variáveis.

Palavras-chave: Desaguamento; Tubo Geotêxtil; Resíduos de ETA; Condicionamento químico; Planejamento Experimental.

ABSTRACT

The residues of the full cycle water treatment plant (WTPs) are generated from coagulation / flocculation operations and removed in the decantation and filtration steps, in order to clarify the raw water. These wastes cause environmental impacts when discarded improperly in untreated water bodies. In general, they have low solids concentration and difficult dehydration, and the steps of densification and dewatering are necessary for their proper disposal. Geotextile has proven to be an efficient and feasible method in this stage, from a technical, economic and environmental perspective. Aiming to assist in the study of design parameters to be adopted in waste treatment systems, this work evaluated the method of dewatering waste of WTPs using geotextile, by means of pressurized tests, simulating the operation of bags. Three study residues with different total suspended solids (TSS) contents were prepared and three synthetic polymers (cationic, anionic and non-ionic) were tested with different dosages. Experimental Statistical Planning was used to optimize and maximize the yield of the experiments. The results showed that the initial TSS of the residue and the dosage and type of chemical conditioning influences the quality of the filtrate and the time of dewatering, being the cationic polymer the one that presented greater statistical effect for the variables.

Keywords: Dewatering; Geotextile Tube; WTP waste; Chemical conditioning; Experimental planning.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCC	Delineamento do Composto Central
DFC	Delineamento de Faces Centradas
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ED	Eficiência de Desaguamento
EF	Eficiência de Filtração
ETA	Estação de Tratamento de água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial Hidrogeniônico
RE	Resíduo de Estudo
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
SV	Sólidos Voláteis
TSi	Teor de Sólidos inicial
TSf	Teor de Sólidos final
uT	Unidade de Turbidez

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Impurezas contidas na água	19
Figura 2 - Principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano	20
Figura 3 - Esquema do sistema de lagoas de lodo	27
Figura 4 - Esquema do leito de secagem	28
Figura 5 - Sistema de filtração em bag de geotêxtil (a esquerda, o bag durante o bombeamento; a direita, o resíduo sólido consolidado no bag)	28
Figura 6 - Princípio de funcionamento de centrifugas empregadas na desidratação de resíduos	29
Figura 7 - Mecanismo de funcionamento do filtro prensa.....	29
Figura 8 - Tipos de contenção geotêxtil: (a) tubos geotêxteis; (b) recipientes geotêxteis; (c) sacos geotêxteis	31
Figura 9 - Diminuição do volume e aumento da concentração de sólidos com o tempo	33
Figura 10 - Distribuição da umidade em tubos geotêxteis e formação de filter cake.....	34
Figura 11 - Montagem do ensaio de cone em geotêxtil.....	37
Figura 12 - Aparelho do teste de filtração pressurizado	38
Figura 13 - Modelo de aparelho utilizado por Spritzer, Khachan e Bathia (2015)	38
Figura 14 - ETA 006	42
Figura 15 - Fluxograma com etapas da pesquisa	43
Figura 16 - Coleta do resíduo pela tubulação de descarga do decantador	46
Figura 17 - "Resíduo Mãe" armazenado em reservatório.....	46
Figura 18 – À esquerda, diluição do “Resíduo Mãe” em água filtrada para preparação do resíduo de estudo; À direita, concentrações dos três resíduos de estudo preparados	47
Figura 19 - Representação do planejamento no sistema de filtração pressurizado em geotêxtil	48
Figura 20 - Filtro pressurizado em geotêxtil utilizado	50
Figura 21 - Resíduos coletados para início dos ensaios	51
Figura 22 - Separação do polímero para preparação do condicionante químico	51
Figura 23 - Preparação do polímero para ensaio	52
Figura 24 - Preparação resíduo com condicionante químico	52
Figura 25 - Resíduo no filtro pressurizado	53

Figura 26 - Resíduo retido no geotêxtil	53
Figura 27 - Resíduo filtrado	54
Figura 28 - Curva granulométrica do “Resíduo Mãe”	56
Figura 29 - Análise qualitativa dos elementos químicos constituintes na parte sólida do “Resíduo Mãe”	57
Figura 30 - Superfícies de resposta da turbidez do filtrado com o Polímero Catiônico	64
Figura 31 – Superfícies de resposta do tempo de desaguamento com Polímero Catiônico	65
Figura 32 - Aspecto do geotêxtil ao final dos ensaios 1, 3 e 5 (esquerda para direita), utilizando Polímero Catiônico, com SST inicial do resíduo de 0,25 g/L.....	66
Figura 33 - Aspecto do geotêxtil ao final dos ensaios 7, 8 e 9 (esquerda para direita), utilizando Polímero Catiônico, com SST inicial do resíduo de 10,125 g/L.....	66
Figura 34 - Aspecto do geotêxtil ao final dos ensaios 2, 4 e 6 (esquerda para direita), utilizando Polímero Catiônico, com SST inicial do resíduo de 20 g/L.....	66
Figura 35 – Superfície de resposta do tempo de desaguamento com polímero aniônico	74
Figura 36 - Superfícies de resposta dos índices: turbidez do filtrado (a), tempo de desaguamento (b), com polímero não-iônico	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resíduos prováveis gerados em processos de tratamento de água	25
Tabela 2 – Produção teórica de sólidos	25
Tabela 3 – Teor de sólidos para diferentes tecnologias de desaguamento	30
Tabela 4 – Propriedades físicas do geotêxtil.....	43
Tabela 5 - Equipamentos utilizados na pesquisa	44
Tabela 6 - Parâmetros, métodos e limites de medição	45
Tabela 7 - Níveis dos fatores empregados no planejamento experimental de faces centradas (DFC) nos ensaios em sistema pressurizado	48
Tabela 8 - Experimentos realizados utilizando delineamento de face centrada (DFC) nos ensaios em sistema pressurizado em geotêxtil	49
Tabela 9 - Volume de polímero em ensaios em sistema pressurizado em geotêxtil ..	49
Tabela 10 - Volume de resíduos preparados de acordo com o "Resíduo Mãe"	55
Tabela 11 - Parâmetros físico-químicos dos resíduos de estudo.....	56
Tabela 12 - Resultados de turbidez do filtrado e tempo de desaguamento nos ensaios do delineamento DFC, para o Polímero Catiônico.	58
Tabela 13 - Resultados de turbidez do filtrado e tempo de desaguamento nos ensaios do delineamento DFC, para o Polímero Aniônico.	59
Tabela 14 - Resultados de turbidez do filtrado e tempo de desaguamento nos ensaios do delineamento DFC, para o Polímero Não-lônico.....	59
Tabela 15 - Resultados estatísticos das respostas turbidez do filtrado e tempo de desaguamento, para o Polímero Catiônico	61
Tabela 16 - Resultados estatísticos das respostas turbidez do filtrado e tempo de desaguamento, para o Polímero Aniônico	61
Tabela 17 - Resultados estatísticos das respostas turbidez do filtrado e tempo de desaguamento, para o Polímero Não-lônico.....	62
Tabela 18 - Análise de variância da turbidez do filtrado para desaguamento com Polímero Catiônico	63
Tabela 19 - Análise de variância do tempo de desaguamento com Polímero Catiônico	63
Tabela 20 - Porcentagem de sólidos retidos em geotêxtil ao fim de ensaios	67

Tabela 21 - Análise de variância da turbidez do filtrado e tempo de desaguamento com polímero aniônico	74
Tabela 22 - Análise de variância da turbidez do filtrado e tempo de desaguamento com polímero não-iônico	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 PROBLEMA DE PESQUISA	16
3 JUSTIFICATIVA.....	17
4 OBJETIVOS.....	18
4.1 Objetivo geral	18
4.2 Objetivos específicos	18
5 REVISÃO DE LITERATURA	19
5.1 Tecnologias de tratamento de água	19
5.1.1 ETAs de ciclo completo	20
5.2 Caracterização qualitativa e quantitativa dos resíduos.....	22
5.3 Tecnologia de tratamento dos resíduos de estações de tratamento de água	26
5.4 Uso do geotêxtil no desaguamento dos resíduos gerados em ETAs	30
5.4.1 Processo de desidratação de resíduos de estações de tratamento de água em sistema de geotêxtil fechado	33
5.4.2 Critérios de avaliação de desaguamento	35
5.4.3 Aceleradores de desidratação	36
5.4.4 Ensaios para avaliação do desempenho do desaguamento em geotêxtil	37
5.5 Legislação ambiental sobre resíduos de ETAs	39
6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	42
6.1 Equipamentos e materiais.....	43

6.2 Coleta, preparo e caracterização dos resíduos de estudo	45
6.3 Ensaaios de bancada em geotêxtil	47
6.3.1 Planejamento estatístico experimental	47
6.3.2 Montagem do filtro pressurizado em geotêxtil	50
6.3.3 Ensaaios no filtro pressurizado em geotêxtil	51
6.3.4 Análise dos resultados dos ensaios pressurizados	54
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
7.1 Preparo e caracterização dos resíduos de estudo	55
7.2 Ensaaios laboratoriais de desaguamento em geotêxtil	57
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	68
8.1 Conclusões	68
8.2 Recomendações	68
9 REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE A	74

1 INTRODUÇÃO

O fornecimento de água de qualidade à população é um procedimento essencial de saneamento básico, direito indispensável assegurado pela Constituição Federal Brasileira de 1988, uma vez que proporciona saúde e bem-estar social.

Em seu estado natural, a água apresenta diversas impurezas que podem comprometer a saúde humana. A qualidade da água nos rios da América Latina tem sido comprometida com a poluição orgânica, por sólidos dissolvidos, microrganismos patógenos e aumento da concentração de coliformes e de produtos químicos perigosos (NICODEMO, *et al.*, 2018).

Para ser fornecida à população, a água deve atender a padrões de potabilidade normatizados pela Portaria de Consolidação nº 5 – anexo XX, do Ministério da Saúde (2017). A qualidade da água é representada através de parâmetros que definem suas características físicas, químicas e biológicas. É necessário que ela passe por um tratamento que enquadre seus parâmetros dentro dos valores permitidos pela legislação.

De acordo com o IBGE (2008), o tratamento do tipo convencional era empregado em 69,2% da água distribuída no Brasil. Nesse processo, a água bruta passa pelos processos de floculação, decantação, filtração e desinfecção, correção do pH (se necessário) e a fluoretação.

As estações de tratamento de água convencionais geram resíduos majoritariamente nos decantadores e filtros, ao passar pelas etapas de decantação e filtração, respectivamente. As características destes resíduos estão relacionadas a diversos fatores, tais como qualidade da água bruta, tipo e dosagem de produtos químicos adicionados e condições de operação (CORDEIRO, 1999a). Em geral, pode-se dizer que os resíduos de ETAs são constituídos basicamente por compostos orgânicos e inorgânicos presentes na forma sólida ou dissolvida no manancial, juntamente com os resíduos de produtos químicos utilizados durante o tratamento da água (SILVEIRA, 2012).

No Brasil, a maior parte das estações de tratamento lançam seus resíduos diretamente em corpos hídricos, sem qualquer forma de tratamento (ANDRADE, SILVA, OLIVEIRA., 2014). Tendo em vista a degradação ambiental provocada por diversas formas de poluentes, foram adotadas medidas preventivas e de remediação,

com o objetivo de proteger os ecossistemas aquáticos. A Lei 9.605/1998 considera crime ambiental o lançamento de resíduos *in natura*, visto que possuem potencial tóxico para o homem, plantas e organismos aquáticos.

A NBR 10.004 (ABNT, 2005) inclui lodos provenientes de sistemas de tratamento de água na definição de resíduos sólidos, não sendo permitido o seu lançamento *in natura* no meio ambiente. No entanto, sua composição apresenta elevado teor de umidade, geralmente superior a 95%, tornando dispendioso o seu transporte para sua destinação final (SILVEIRA, 2012).

Dessa forma, busca-se o estudo de tecnologias de tratamento de resíduos que minimizem o impacto ambiental após sua destinação final e que atenda às legislações ambientais vigentes. O tratamento de resíduos de ETAs consiste numa separação sólido-líquido, visando o aumento do teor de sólidos no material sedimentado, possibilitando a reutilização e/ou descarte ambientalmente adequado do filtrado e a disposição adequada do material sólido (SILVEIRA, 2012).

Dentre as tecnologias utilizadas, pode-se citar os processos naturais (lagoas de lodo, leitos de secagem e tecido geotêxtil) e os mecanizados (centrífugas, filtro prensa, prensa desaguadora, filtro a vácuo, etc.).

O desaguamento de resíduos de ETAs com sistemas fechados de geotêxtil começaram a ser utilizados em meados da década de 1990. Desde então têm sido utilizados para desaguar resíduos com grande teor de água e aqueles contaminados. Possui como características a redução no tempo de desidratação, redução de custo operacional e facilidade de construção (MOO-YOUNG e TUCKER, 2002; FOWLER *et al.*, 1996).

Para prever a eficiência de desaguamento e filtração dos resíduos de ETAs com o uso de geotêxtil são realizados testes, em escala laboratorial e/ou em estações piloto. Dentre os ensaios laboratoriais em pequena escala os mais utilizados são: teste de queda e ensaio pressurizado. Devido a não padronização dos mesmos, tem-se variações na sua operação, métodos e interpretação de dados (MAURER, *et al.*, 2011).

Desse modo, o presente trabalho busca avaliar o desempenho de sistemas de desaguamento de resíduos de ETAs utilizando geotêxtil, por meio de ensaios laboratoriais em sistemas pressurizados.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

Os resíduos gerados nas unidades de separação sólido-líquido (decantadores), visando a remoção de cor e turbidez, possuem baixo teor de sólidos, normalmente inferior a 1%. Torna-se então, necessário que o resíduo passe pela fase de adensamento e posterior desidratação. No entanto, cada unidade geradora de resíduos possui características distintas em concentração de sólidos e vazão, demandando concepções de tratamento distintas para cada uma (FERREIRA FILHO, 2017).

Guanaes (2009) aponta que o desaguamento de resíduos de granulometria fina, com resistência à filtração, como no caso daqueles gerados em ETAs, requer estudos individualizados e muitas vezes o auxílio de condicionantes químicos para desaguamento. Segundo Kutay e Aydilek (2004), o desempenho de geotêxteis no desaguamento de materiais de grãos muito finos e baixo teor de sólidos, tem sido geralmente fraco, visto que há uma perda excessiva de sólidos no efluente. Nesses casos, tem sido realizado o pré-tratamento químico com polímeros.

Ferreira Filho (2017) diz que a dosagem de polímeros é normalmente definida em função dos sólidos do resíduo, sendo fundamental sua homogeneização e uniformidade no teor de sólidos. Caso haja polímero em excesso, além do fator econômico, o produto tenderá a sair junto com o filtrado. Já no caso da sua falta, poderá comprometer a qualidade do filtrado.

Tominaga (2010) enfatiza que antes da utilização do sistema fechado em geotêxtil em campo, devem ser realizados ensaios em laboratório, com o intuito de avaliar o desempenho filtrante do geotêxtil e a necessidade ou não de condicionamentos químicos. Analisa-se, então, a qualidade do efluente e do material retido.

A seleção de um polímero e a otimização de sua concentração e dosagem tem influência direta no processo de desaguamento de resíduos. Diante desse contexto, no presente trabalho, a busca pelo polímero ideal e teor de SST inicial do resíduo será auxiliada por meio de ensaios pressurizados em tubo geotêxtil.

3 JUSTIFICATIVA

A geração de resíduos durante operação de tratamento de água é inevitável. Nas estações convencionais são oriundos principalmente de decantadores e filtros. Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a maioria destes resíduos são descartados em corpos hídricos, apesar de haver restrições para seu lançamento na natureza conforme leis federais, acarretando em uma série de impactos ambientais.

Com as regulamentações que impedem o descarte de resíduos líquidos e sólidos em cursos d'água, torna-se necessário que haja melhor armazenamento e tratamento, e até mesmo a eliminação destes resíduos. Sendo assim, o resíduo deve passar por uma fase de tratamento preliminar, a fim de reduzir seu volume e torná-lo gerenciável para manuseio, transporte e disposição (LAWSON, 2008).

Considerando que há legislações que restringem o lançamento dos resíduos das estações de tratamento de água na natureza, tem sido crescente o empenho das instituições que gerenciam as ETAs em cumprir as disposições legais e em obter os padrões de qualidade requeridos, de modo que sejam buscadas alternativas de tecnologias de tratamento de resíduos com menor custo/benefício (SABOGAL-PAZ E DI BERNARDO, 2005).

A utilização de geotêxtil no desaguamento de resíduos tem sido uma alternativa viável devido à sua alta eficiência, baixo custo de energia e baixo impacto ambiental, quando comparado com as tecnologias convencionais (MOO-YOUNG e TUCKER, 2002).

Desse modo, esta pesquisa busca fornecer dados sobre desempenho de geotêxtil na etapa de desaguamento de resíduos de ETAs, quando submetido à ensaios laboratoriais em sistema pressurizado.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desaguamento de resíduos gerados no tratamento de água utilizando sistema pressurizado em tubo geotêxtil.

4.2 Objetivos específicos

- Verificar a influência dos polímeros sintéticos catiônico, não iônico, aniônico na eficiência do desaguamento do resíduo de ETA, como condicionantes químicos;
- Verificar a influência dos sólidos suspensos totais no resíduo a ser desaguado;
- Avaliar, por meio da ferramenta estatística DOE (*design of experiments*), o desaguamento do resíduo de ETA, identificando o nível de influência dos fatores: sólidos suspensos totais no resíduo e dosagem dos condicionantes químicos.

5 REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Tecnologias de tratamento de água

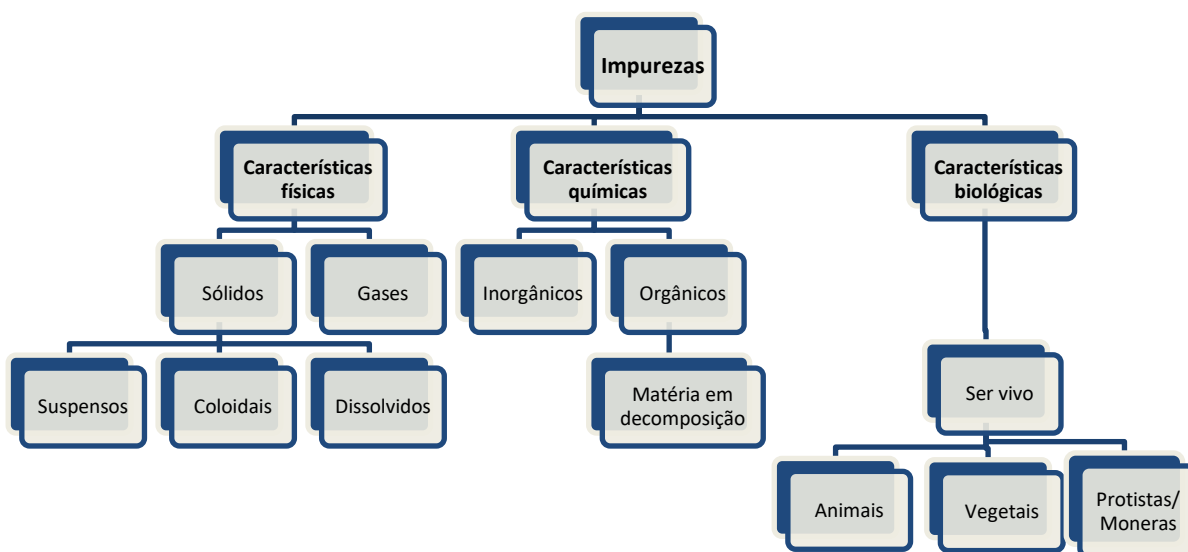
A água pode ter múltiplas destinações, desde consumo humano à fins agrícolas e industriais. Este recurso natural deve estar apropriado para seus usos mais exigentes.

Ao ser captada em um manancial, pode não atender aos requisitos de potabilidade, apresentando partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias deletérias à saúde humana (SILVEIRA, 2012).

A NBR 12.216/1992 define estação de tratamento de água como: “Conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade”. A norma classifica as águas naturais conforme os valores de características básicas – DBO, coliformes, pH, cloretos e fluoretos – e prescreve os tratamentos mínimos necessários para que as enquadre nos padrões de potabilidade. As unidades da ETA envolvem processos e operações que visam à remoção da cor, turbidez e microrganismos presentes na água bruta (TAVARES, 2016).

Como água bruta normalmente apresenta componentes que comprometem seu grau de pureza, se tornam necessárias as suas caracterizações físicas, químicas e biológicas para definir a tecnologia a ser adotada no tratamento da água (VON SPERLING, 2017). A Figura 1 apresenta as impurezas encontradas na água.

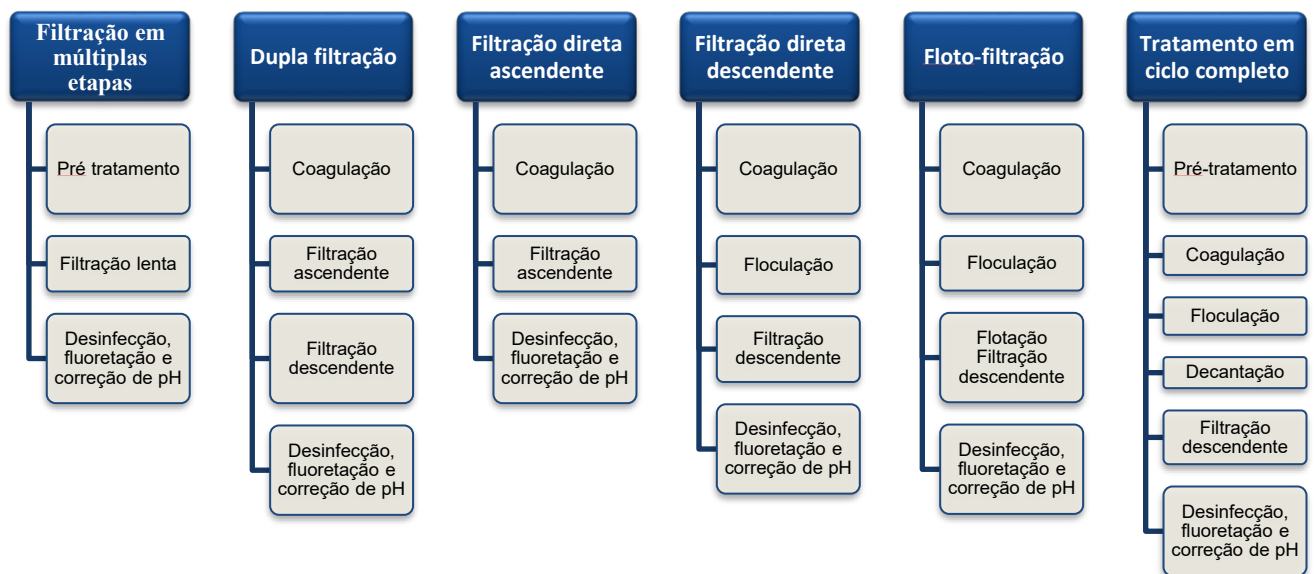
Figura 1 - Impurezas contidas na água



Fonte: Von Sperling (2017, adaptado)

Di Bernardo e Dantas (2005) resumem as tecnologias de tratamento de água em dois grandes grupos: com coagulação química e sem coagulação química. Na Figura 2 são apresentadas as principais tecnologias de água com e sem coagulação química.

Figura 2 - Principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano



Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005, adaptado)

A escolha da tecnologia de tratamento de água está associada a qualidade necessária para seu uso final e a condição da água bruta, no manancial a ser adotado. São considerados também os custos de implantação, operação e manutenção.

5.1.1 ETAs de ciclo completo

Dentre as principais tecnologias, o tratamento de água em ciclo completo é o mais usual no Brasil (CORDEIRO, 1999a). Este sistema emprega produtos químicos, tal como sais de alumínio ou de ferro, para que haja reação química nas partículas presentes na água bruta.

A coagulação química desestabiliza as partículas coloidais devido a diminuição das barreiras eletrostáticas, permitindo que as partículas se aglutinem e formem flocos que posteriormente poderão ser retirados por meio de processos físicos (TAVARES, 2016). Quando feita de maneira inadequada, pode acarretar na produção

de efluente de má qualidade. Em tratamentos em ciclo completo, se ineficiente, pode comprometer o desempenho da sedimentação e da filtração (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011).

A adição do coagulante ocorre em unidades de mistura rápida, em misturadores que podem ser hidráulicos ou mecânicos. A velocidade elevada é necessária para dispersar rapidamente o coagulante. Em seguida, a água é submetida ao processo de floculação, ou mistura lenta, promovendo contato entre as impurezas, originando partículas grandes e densas denominadas de flocos (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Os flocos são removidos do meio aquoso por ação da gravidade, sedimentando em decantadores, clarificando a água. As partículas de flocos que sedimentam constituem o lodo químico (formado pela adição de coagulantes) (PIEPER, 2008).

Após a decantação, a água segue para os filtros, no qual devem ser removidos os flocos que não sedimentaram. As unidades de filtração são preenchidas com meio porosos com granulometria adequada. Esta etapa proporciona uma água com baixa turbidez (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008).

Com a retenção das partículas nos filtros, há sua sobrecarga após um período de aproximadamente 48h. Devem, então, ser lavados para retirar as partículas acumuladas e permitir o processo de filtração (TAVARES, 2016).

Posteriormente a água segue para a etapa de desinfecção, com emprego de um agente químico ou físico, para desabilitar os microrganismos patogênicos presentes na água (DI BERNARDO E DANTAS, 2005). Em seguida é encaminhada para fluoretação e ajuste de pH, se necessário.

Os resíduos do tratamento de águas são constituídos por materiais removidos durante o processo, como sólidos orgânicos e inorgânicos, bactérias, algas, vírus, protozoários, colóides e sais dissolvidos, causadores da turbidez à água bruta. São removidos da água por meio de produtos químicos adicionados no tratamento da água. Normalmente esses resíduos apresentam baixa biodegradabilidade, alto teor de sólidos totais, agentes patógenos e, eventualmente, metais pesados que podem ser tóxicos à vida aquática (BARBOSA, 2000).

Quando o sulfato de alumínio é utilizado como coagulante primário durante o tratamento, tem-se um resíduo com alta concentração de alumínio. Quando o resíduo é disposto em rios com baixa velocidade, há alteração na sua camada

bentônica. Estudos mostram que o alumínio é tóxico, provocando a morte ou mudança das condições físicas de peixes. Em humanos, tem-se notado que a concentração deste metal tem importância em doenças cardiovasculares e está relacionado também com deficiências renais (CORDEIRO, 1999a).

A prática do descarte de resíduos em corpos hídricos provoca o aumento na concentração de metais tóxicos, principalmente alumínio e ferro, a alta concentração de sólidos suspensos, prejuízos no ciclo de nutrientes, principalmente o fósforo, mortalidade de peixes, alteração de pH, desenvolvimento de condições anaeróbias em águas estacionárias ou de baixa velocidade, aumento de turbidez e cor, etc (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

5.2 Caracterização qualitativa e quantitativa dos resíduos

Em ETAs de ciclo completo há predominantemente a geração dos seguintes resíduos: resíduos sólidos acumulados dos decantadores e água de lavagem dos filtros. Esses resíduos possuem características diferentes, que influenciam no processo de desidratação (CORDEIRO, 1999a). O maior volume de resíduo é proveniente da lavagem dos filtros, mas em termos mássicos, a maior quantidade provém dos decantadores (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Convencionalmente, de 3% a 5% do volume de água bruta que entra numa ETA de ciclo completo pode originar em resíduos, sendo o maior volume proveniente do processo de lavagem dos filtros, porém com baixo teor de sólidos. Já o volume oriundo dos decantadores estão na faixa de 0,1% a 0,3% da vazão da ETA, no entanto, contando com maior teor de sólidos (CRITTENDEN, *et al.*, 2012).

A quantidade e qualidade de resíduo produzido numa ETA dependerá de múltiplos fatores, tais como: qualidade da água bruta a ser tratada; tecnologia de tratamento empregada; dosagem e tipo de produtos químicos aplicados durante tratamento; tempo de permanência do resíduo nos decantadores e eficiência das unidades de floculação; método de limpeza dos decantadores e técnica de lavagem dos filtros (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008; REALI, 1999).

Em cada unidade de tratamento em que ocorre a remoção de sólidos da água, o princípio de funcionamento da unidade, o procedimento operacional e o tipo de produto químico adicionado interagem para produzir resíduos com volumes e

massas diferentes, como é o caso daqueles produzidos em decantadores e filtros (KATAYAMA, 2012).

No caso da influência das características da água bruta da ETA no resíduo gerado, tem-se que aqueles com alto teor de matéria orgânica apresentam as piores condições de adensamento e de desaguamento, quando comparado com resíduos majoritariamente compostos por materiais sólidos inorgânicos (DULIN, B. E, et al., 1989 apud DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008)

As características químicas dos resíduos são determinadas pela qualidade dos produtos químicos utilizados durante o tratamento. Reali (1999) cita que em estações de tratamento de água que utilizam sulfato de alumínio como coagulante, o resíduo sólido produzido tem coloração marrom, com viscosidade e consistência semelhante a chocolate líquido. É um resíduo tixotrópico, ou seja, em repouso possui estado em gel e se torna relativamente fluido quando agitado. Além de ser, normalmente, de difícil sedimentação ou flotação em estado natural. Em estações em que há o uso de sais de ferro como coagulante também há dificuldade na flotação ou sedimentação natural, sendo necessária a adição de polímeros. Nesse caso o resíduo tem coloração marrom-avermelhada.

Segundo Reali (1999), a concentração de sólidos presentes no resíduo descartado dos decantadores varia entre 0,1% a 2,0%. Di Bernardo (2005, apud Barroso, 2007) apresenta que resíduos de decantadores possuem teor de sólidos entre 6.000 e 30.000 mg/L, enquanto que o resíduo de lavagem de filtros apresenta valores em torno de 300 mg/L.

Segundo Barroso (2007), a variação do teor de sólidos em resíduos de ETA depende de inúmeros fatores, tais como:

- Características da água bruta e tecnologia adotada para tratamento;
- Tipo e dosagem de produtos químicos utilizados;
- Estrutura da ETA, os tipos de decantadores e filtros e respectivos mecanismos de limpeza;
- Eficiência dos processos e operações de tratamento;
- Duração e intervalo de lavagens de decantadores e filtros;
- Problemas operacionais e deficiência de recursos humanos

Os resíduos são uma combinação entre uma fase sólida e líquido. As quantidades relativas das diferentes frações de água que constituem o resíduo – água

livre, intersticial, vicinal e de hidratação – são fatores determinantes na retenção de água dos resíduos e seu desempenho no sistema de remoção de água. (REALI, 1999).

Outra dificuldade na desidratação desses resíduos é a resistência específica de filtração, visto que quanto maior o valor deste parâmetro, maior a dificuldade de remoção da água por filtração. Resíduos de decantadores apresentam resistência específica acima de $5 \cdot 10^{12}$ mg/kg, enquanto aqueles gerados após a lavagem dos filtros constam com valores entre 0,1 e $15 \cdot 10^{12}$ mg/kg (REALI, 1999).

Polímeros sintéticos podem ser adicionados nos resíduos das ETAs para diminuir o valor da resistência específica à filtração, facilitando a desidratação do resíduo (REALI, 1999).

Os principais parâmetros para caracterização de resíduos de estações de tratamento de água são: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), pH, sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos voláteis (SSV), concentração dos principais íons metálicos, concentração de fósforo total, índices de coliformes totais e termotolerantes, etc. (REALI, 1999).

Parâmetros que caracterizam a natureza física podem ser empregados, como filtrabilidade, resistência específica, sedimentabilidade, compressibilidade e tamanho e distribuição das partículas de sólidos. Esses parâmetros auxiliam na definição do método de desaguamento e na determinação do tipo de equipamento e condições de funcionamento para o tratamento (KATAYAMA, 2012).

A quantificação do resíduo gerado na ETA é necessária no planejamento das unidades geradoras, nas unidades de tratamento e sua disposição final. Para as ETAs ainda em fase planejamento, recomenda-se realizar *jar tests* ou ensaios em estações piloto para quantificar a geração de resíduos conforme as características da água bruta e condições de operações da ETA (DI BERNARDO e DANTAS, 2005; KATAYAMA, 2012).

Alternativamente, essa quantificação pode ser estimada por meio de equações empíricas, que relacionam a dosagem dos coagulantes utilizados e outros parâmetros, tais como turbidez, cor e sólidos suspensos na água bruta, dentre outras variáveis. Nesse caso, assume-se que os sólidos gerados pelo tratamento da água são oriundos da fração de sólidos da água bruta, os quais são removidos no

tratamento, e os sólidos precipitados decorrentes dos produtos químicos adicionados durante o tratamento da água (KATAYAMA, 2012; REALI, 1999).

No caso de ETAs já existentes, a quantificação pode ser feita pelo balanço de massa. Define-se certo volume de controle, englobando os processos e operações unitárias da ETA. É analisada a vazão e o teor de sólidos na entrada e na saída do volume de controle (KATAYAMA, 2012).

A Tabela 1 apresenta os resíduos mais comuns a serem gerados nas etapas do tratamento de água. Na Tabela 2 são apresentados valores teóricos da formação de sólidos conforme o agente químico introduzido na água.

Tabela 1 – Resíduos prováveis gerados em processos de tratamento de água

Produto Químico	Proveniente de:	Aparece no resíduo como:	Sólido
Sólidos dissolvidos	Água bruta	Sólidos dissolvidos	Somente se precipitados
Sólidos suspensos (silte)	Água bruta	Silte - sem mudança	Sim
Matéria orgânica	Água bruta	Provavelmente sem mudança	Sim
Sais de alumínio	Coagulação química	Hidróxido de alumínio	Sim
Sais de ferro	Coagulação química	Hidróxido de ferro	Sim
Polímeros	Tratamento químico	Sem mudança	Sim
Cal	Tratamento químico e correção de pH	Ou carbonato de cálcio ou, se for usado solução de cal, somente impurezas	Sim
Carvão ativado em pó	Controle de sabor e odor	Carvão ativado em pó	Sim
Cloro, ozônio	Desinfecção	Em solução	Não

Fonte: Realí (1999)

Tabela 2 – Produção teórica de sólidos

Produto Químico	g de Sólidos Produzidos por g de Produto Químico
Sólidos suspensos (silte)	1,0
Matéria orgânica	1,0
Sulfato de alumínio	0,26 como $\text{Al}(\text{OH})_3^*$
Cloreto férrico	0,66 como $\text{Fe}(\text{OH})_3^*$
Polímero	1,0
Cal	Permite 0,1 como fração insolúvel
Carvão ativado em pó	1,0

*Dependendo da forma de hidratação do sulfato de alumínio ou cloreto férrico

Fonte: Realí (1999)

5.3 Tecnologia de tratamento dos resíduos de estações de tratamento de água

Os resíduos gerados nas ETAs são caracterizados pela grande umidade, estando normalmente sob forma fluida. Devido à grande quantidade de água incorporada ao resíduo (aproximadamente 97%), o transporte para destiná-lo à alguma empresa que o aceite como matéria prima é economicamente inviável. É necessário reduzir seu volume, por meio do desaguamento. Desse modo o resíduo pode ser disposto de forma adequada, reduzindo os custos de transporte e disposição final, além de diminuir os riscos de poluição ao meio ambiente (FERRANTI, 2005; CORDEIRO, 1999a).

Normalmente, em ETAs que utilizam sulfato de alumínio ou de ferro como coagulantes possuem teor de sólidos entre 0,1% e 1,0%. No entanto, é necessário atingir uma concentração mínima de sólidos totais para seguir para o processo de desaguamento. Alguns equipamentos de desidratação recomendam que este teor seja superior a 2%. Para isso, o processo de adensamento deve preceder o desaguamento. Os adensadores podem ser por gravidade, flotação com ar dissolvido ou de esteiras (FERREIRA FILHO & SOBRINHO, 1998; REALI, 1999).

Na escolha do método do desaguamento devem ser realizadas análises, seja em laboratório ou em escala-piloto, com amostras da água a ser tratada. Deve ser considerado também a condição climática local, área necessária para instalação, custo de equipamentos, necessidade de condicionamento, entre outros fatores (PIEPER, 2008).

Sabogal-Paz e Di Bernardo (2005) apontam as seguintes variáveis para justificar o fenômeno de dificuldade de remoção de água do resíduo, dependendo do condicionamento químico:

I) a hidratação das partículas pode formar uma película líquida carregada negativamente que impede a aproximação das mesmas para que se aglutinem; II) as partículas de lodo são carregadas eletricamente e tendem a se repelir em vez de formar flocos e, III) a agitação durante seu processamento pode reduzir o tamanho médio dos flocos e, conseqüentemente, aumentar as áreas superficiais das partículas, impondo maior resistência à separação das fases sólida e líquida.

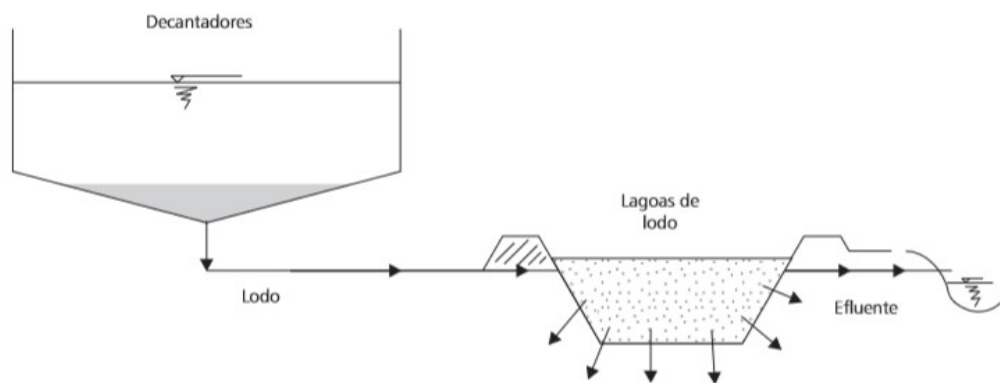
O condicionamento químico é o procedimento de adição de produtos químicos no resíduo, que promove a aglutinação das partículas que serão removidas nos sistemas de desidratação. Este processo pode ser feito com o auxílio de polímeros catiônicos, aniônicos e não iônicos (CORDEIRO e WIECHETECK, 2002).

A remoção de água livre dos resíduos, ou desidratação, pode ser realizada por sistemas naturais ou mecânicos. Os sistemas naturais são compostos por lagoas de lodo, leitos de secagem e *bags* em geotêxtil. Dentre os equipamentos mecânicos, tem-se: centrífugas, filtro prensa, prensa desaguadora e filtro a vácuo (PIEPER, 2008).

Locais com alto grau de insolação, baixa umidade do ar e precipitação são ideais para implantação de lagoas de lodo e leitos de secagem, visto que o processo de evaporação é mais eficiente. (FERREIRA FILHO, 2017)

De modo geral, as lagoas de lodo possuem duas ou mais unidades operando em paralelo. Consiste basicamente de tanques rasos que recebem o resíduo até seu completo enchimento (REALI, 1999). A Figura 4 mostra o sistema de lagoas de lodo.

Figura 3 - Esquema do sistema de lagoas de lodo

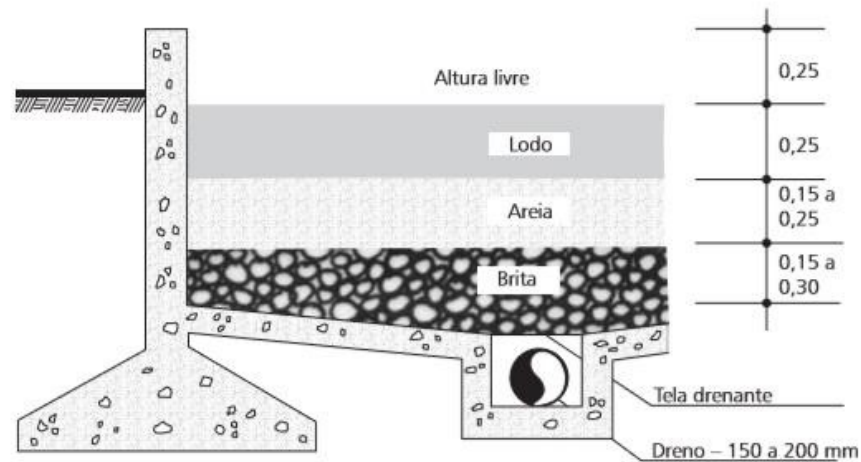


Fonte: Cordeiro (1999c)

Os leitos de secagem são empregados extensivamente no processo de secagem de resíduos de estações de tratamento de água de pequeno porte. Seu princípio de funcionamento envolve a disposição do resíduo em um sistema de drenagem e após esta etapa ocorre a perda de umidade por evaporação (FERREIRA FILHO, 2017).

São constituídos de tanques rasos com fundo filtrante com camada de brita e areia de granulometria adequada, de modo a permitir a percolação da água (PIEPER, 2008). O sistema é formado por um meio suporte, outro filtrante e sistema drenante (CORDEIRO, 1999c).

Figura 4 - Esquema do leito de secagem



Fonte: Reali (1999)

A camada filtrante do leito de secagem, com emprego de areia e brita, gera alto custo na implantação da estrutura. Aliando este fato às dificuldades construtivas, foram propostas mudanças em sua estrutura, através da eliminação da camada de areia e parte da camada de brita, sendo substituído por uma camada de membrana geotêxtil acima da camada remanescente de brita (FERREIRA FILHO, 2017).

A filtração em geotêxtil se dá pelo bombeamento do resíduo e escoamento da água ao longo da área superficial, por um meio poroso que retém a fração sólida. Normalmente o processo é feito em sacos (*bags*) que são utilizados até sua capacidade máxima (SILVA, B., 2017).

Figura 5 - Sistema de filtração em bag de geotêxtil (a esquerda, o bag durante o bombeamento; a direita, o resíduo sólido consolidado no bag)



Fonte: Maccaferri, 2015

Ferreira Filho (2017) recomenda que a desidratação do resíduo por bags seja feita com duas ou mais unidades funcionando em paralelo e alternativamente. Desse modo, permite-se a consolidação do resíduo e drenagem do líquido clarificado.

A desidratação por métodos mecanizados é normalmente empregada em estações de tratamento de água de médio a grande porte, devido a sua necessidade de pequena área para implantação e por ser mais flexível na operação de tratamento da fase sólida (FERREIRA FILHO, 2017).

A centrífuga é um dispositivo em formato cilíndrico que faz a separação sólido/líquido por meio da ação centrífuga. O resíduo é introduzido axialmente e devido a força centrífuga, os sólidos se depositam nas paredes do cilindro, sendo posteriormente removido pela rotação da rosca, dispondo na tubulação de saída (PIEPER, 2008). Este equipamento pode ser utilizado para o adensamento e desaguamento de resíduos de estações de tratamento de água.

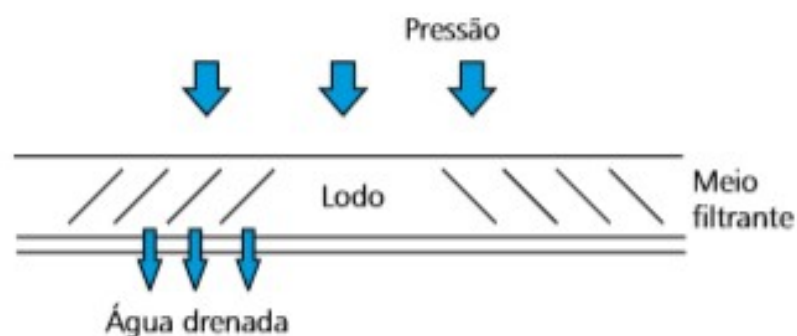
Figura 6 - Princípio de funcionamento de centrífugas empregadas na desidratação de resíduos



Fonte: Ferreira Filho (2017)

A operação do filtro prensa é de forma intermitente. São aplicadas pressões diferenciais, forçando o resíduo a passar pelo meio filtrante. Então, fica retido na câmara a torta com alta concentração de sólidos (CORDEIRO, 1999b).

Figura 7 - Mecanismo de funcionamento do filtro prensa



Fonte: Cordeiro (1999b)

Na prensa desaguadora, ou filtro prensa de correias, o resíduo é retido entre duas correias, sendo uma delas um meio filtrante. Na parte superior, tem-se roletes que promovem a compressão do resíduo, drenando a água. Um fator

fundamental no bom desempenho é a realização de um bom condicionamento (CORDEIRO, 1999b).

Em filtros a vácuo o processo operação consiste na rotação de tambores horizontais em recipientes de resíduos revestido por tela filtrante. São aplicadas pressões positivas e negativas alternadamente em cada volta. Os sólidos ficam retidos na superfície do tambor e o líquido é drenado através do resíduo e da superfície filtrante (CORDEIRO, 1999b).

Os valores encontrados na literatura de teor sólidos mínimo para algumas tecnologias de desaguamento e o valor obtido após o procedimento de desaguamento são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Teor de sólidos para diferentes tecnologias de desaguamento

Tecnologia de desaguamento	Teor de sólidos mínimo antes do tratamento (%)	Teor de sólidos após o tratamento (%)
Centrífuga	2%(Di Bernardo <i>et al.</i> ,2012)	20-30%(Cornwell,1987)
Filtro prensa de esteiras	1-5%(Di Bernardo <i>et al.</i> ,2012)	20-25%(Cornwell,1987)
Leitos de secagem	-	30-40%(Silveira,1987)
Lagoa	-	7-15%(Cornwell,1987)
Tubo geotêxtil	1%(Maccaferri,2018)	20-30%(Guimarães <i>et al.</i> , 2014)

Fonte: Autor (2019)

Realí (1999) cita que no caso de resíduos gerados por meio da coagulação com sulfato de alumínio, para serem dispostos em aterros sanitários, alguns autores recomendam que o seu teor de sólidos totais, em massa, seja superior a 25%. Em regiões em que o destino final do resíduo é distante da ETA, Sabogal-Paz e Di Bernardo (2005) recomendam o uso de métodos de adensamento e secagem com teor de sólidos superior a 30%.

5.4 Uso do geotêxtil no desaguamento dos resíduos gerados em ETAs

O uso de geossintéticos tem diversas aplicações na engenharia, podendo ser utilizado no controle de erosão, reforço, em drenagem e filtração. Como desempenha diferentes funções, podem ser projetados e especificados para aplicação, em função da quantidade do material a ser contido e a disponibilidade de espaço para acomodá-lo (PIEPER, 2008).

O desaguamento de resíduos em geotêxtil deve promover a retenção dos sólidos e eliminação da água. Ele deve proporcionar o desague rapidamente sem que haja a perda excessiva de partículas finas. Associadamente, deve ser resistente às tensões impostas pelos processos de preenchimento e consolidação. Para cumprir essas funções, o tubo geotêxtil pode ser confeccionado com duas camadas, sendo a primeira a interna, responsável pela filtração, e a segunda a externa, com função de resistir às tensões (MAURER, 2011; PIEPER, 2008).

Existem três unidades principais de contenção geotêxtil, classificados conforme sua forma geométrica e volume: tubos, recipientes e sacos geotêxteis, apresentados na Figura 8 (LAWSON, 2008).

Figura 8 - Tipos de contenção geotêxtil: (a) tubos geotêxteis; (b) recipientes geotêxteis; (c) sacos geotêxteis

(a) tubos geotêxteis



(b) recipientes geotêxteis



(c) sacos geotêxteis



Fonte: Lawson (2008)

Os tubos geotêxteis possuem diâmetro entre 1m e 10m e seu comprimento pode ser de até 200 m. São preenchidos no local até a forma geométrica requerida. Já os recipientes geotêxteis variam em volume de 100m³ a 700m³ e são preenchidos acima da água e posteriormente colocados à profundidade. Os sacos de geotêxtil são fabricados com as mais diversas formas e têm variação de volume de 0,05m³ a 5m³ (LAWSON, 2008).

Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011), geralmente *bags* horizontais são empregados em instalações maiores, enquanto nas menores, os *bags* verticais.

Lawson (2008) cita as razões para que o tubos e sacos de geotêxtil seja a escolha ideal para desaguamento de resíduos de ETAs:

- Proporcionam grande área de superfície contato com o resíduo, resultando em uma desidratação eficiente;
- Podem ser fabricados de modo a atender a situações específicas de operação;
- Diferente das tecnologias de desaguamento mecânicas, sua operação é simples e mais barata.

Comparado com as técnicas convencionais naturais, o desaguamento em tubos geotêxteis tem menor dependência de condições meteorológicas, visto que há uma menor entrada de água da chuva pelo geotêxtil (GUIMARÃES, URASHIMA e VIDAL, 2014).

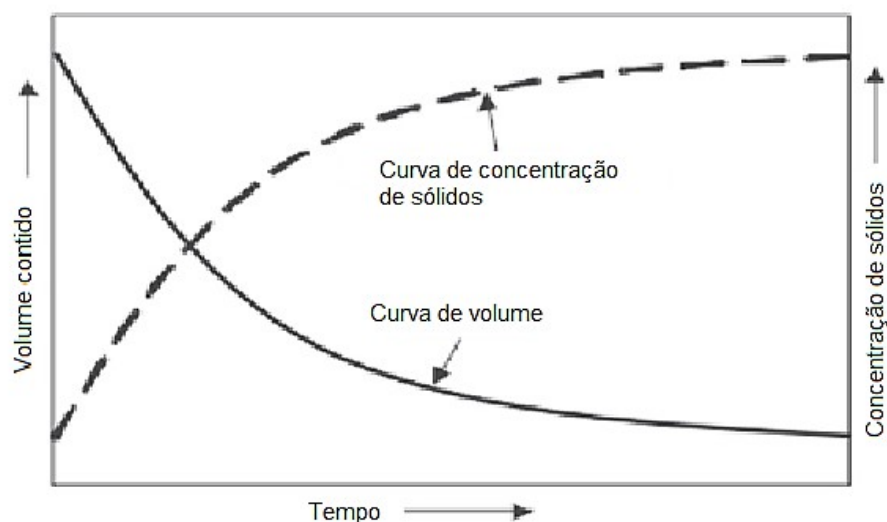
5.4.1 Processo de desidratação de resíduos de estações de tratamento de água em sistema de geotêxtil fechado

Os sistemas fechados de geotêxtil são utilizados como técnica de desidratação de resíduos de estações de tratamento de água, o protegendo e isolando. O procedimento consiste no bombeamento de resíduos em tubos geotêxteis com vazões controladas (GUIMARÃES, URASHIMA e VIDAL, 2014).

O processo de desaguoamento em sistema fechado de geotêxtil envolve quatro fases: (1) drenagem da água livre por meio dos poros do geotêxtil; (2) sedimentação das partículas sólidas retidas; (3) formação do *filter cake*; (4) compressão e consolidação do *filter cake* (KHACHAN e BATHIA, 2017).

Inicialmente, após o resíduo ser bombeado para o geotêxtil, tem-se ao longo do tempo a redução do volume e aumento de concentração de sólidos no tubo geotêxtil (Figura 9). Posteriormente a velocidade da redução de volume diminui devido à redução da condutividade hidráulica do resíduo. Desse modo, a taxa de crescimento do teor de sólidos também é reduzida. Esse processo se dá pela colmatação física ou biológica do geotêxtil, processo chamado de *filter cake* (LAWSON, 2008; PIEPER, 2008).

Figura 9 - Diminuição do volume e aumento da concentração de sólidos com o tempo



Fonte: Lawson (2008)

A primeira etapa de desaguoamento dos resíduos envolve a drenagem da água livre para a superfície do geotêxtil, que ocorre em um período relativamente curto e tem como consequência a perda de grande volume de líquido. Há também o movimento de partículas em suspensão, formando um bolo na superfície do geotêxtil,

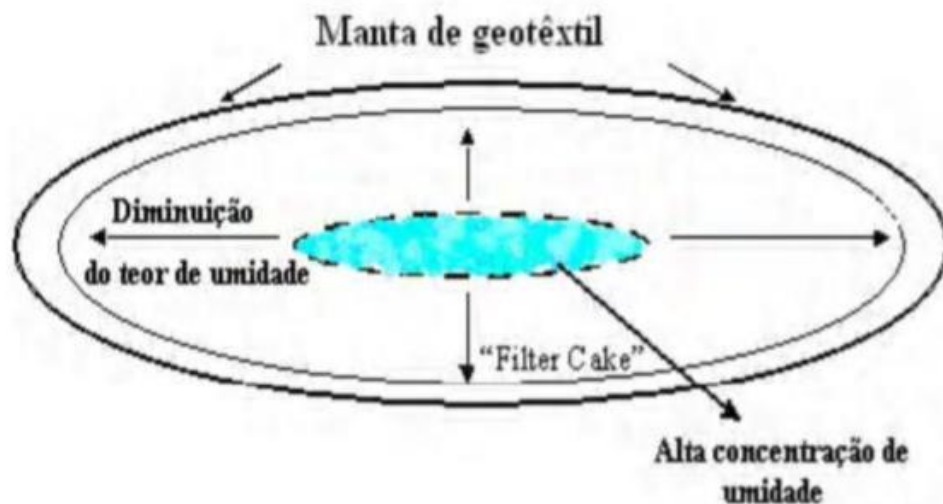
chamada de *filter cake*. Sua formação impede fluxos adicionais de água e das partículas finas para o meio filtrado. Com a perda da água livre, os resíduos entram em uma fase de semi-consolidação (LAWSON, 2008).

A quantidade de resíduo bombeado para o tubo geotêxtil dependerá da sua capacidade de volume, que é regida por suas dimensões e pela resistência à tração do geotêxtil. Após alcançar o volume máximo, o tubo geotêxtil deixa de desaguar por um período (LAWSON, 2008).

Estudos realizados por Moo-Young *et al.* (2002) mostram que o mecanismo de filtração depende da estrutura porosa do geotêxtil e da formação do *filter cake*. Sua formação pode ser monitorada pelo acompanhamento da vazão com que ocorre o desaguamento. Além disso, a quantidade de sólidos em suspensão no líquido desaguado diminui assim que se forma o *filter cake*.

Esses fenômenos dificultam a saída de fluido e provocam a retenção de alto teor de umidade no interior do tubo, conforme mostra a Figura 10. Em alguns casos torna-se necessário o dessecamento dos tubos geotêxteis (PIEPER, 2008).

Figura 10 - Distribuição da umidade em tubos geotêxteis e formação de filter cake



Fonte: Pieper (2008)

Durante a fase de consolidação a perda de água é lenta e regida pela condutividade hidráulica dos resíduos e pela ação do *filter cake*, resultando na perda de volume relativamente baixa (LAWSON, 2008).

A etapa de consolidação pode levar de dois a seis meses, conforme o tipo de resíduo e a teor de sólidos. Tempo de desidratação mais longos limitam a

velocidade de operação e o volume de resíduos que podem ser tratados (LAWSON, 2008).

A capacidade de desidratação do geotêxtil inclui dois aspectos: eficiência da desidratação (obtenção de uma percentagem final de sólidos) e taxa de desidratação (quanto tempo demorará a desidratação). A eficiência de ambos será controlada pela interação entre o resíduo e geotêxtil, e esta conforme as propriedades dos resíduos, do geotêxtil e pressões de filtração. (MOO-YOUNG *et al.*, 2002)

A taxa de desidratação e qualidade do fluido desaguado são parâmetros para determinar o tempo de desidratação e o seu desempenho de retenção em projetos utilizando tubos geotêxteis. Já a análise do teor de sólidos retidos e do volume final no tubo permite a quantificação em escala real de volume de resíduo desidratado, sua consistência e a determinação de tubos geotêxteis necessários (KHACHAN e BHATIA, 2017).

5.4.2 Critérios de avaliação de desaguamento

Embora não exista padronização de critérios para avaliar o desaguamento, autores propuseram índices para esta avaliação, como a eficiência de filtração (EF) e a eficiência de desaguamento (ED).

Segundo Moo-Young *et al.* (2002), a eficiência de filtração pode ser determinada comparando os sólidos suspensos totais antes e após o desaguamento. Trata-se de um índice de retenção de sólidos. O valor percentual da eficiência de filtração pode ser calculado pela Equação 1.

$$EF = \frac{SST_{inicial} - SST_{final}}{SST_{inicial}} * 100 \quad (1)$$

Sendo:

EF = eficiência de filtração (%);

SST_{inicial} = sólidos suspensos totais inicial;

SST_{final} = sólidos suspensos totais final.

Chistopher e Holtz (1985 apud MOO-YOUNG e TUCKER, 2002) recomendam uma eficiência de filtragem mínima de 75%.

Pode-se determinar também a eficiência de desaguamento, comparando o teor de sólidos inicial do resíduo com o teor de sólidos final, retido no geotêxtil. O cálculo segue a Equação 2.

$$ED = \frac{TS_i - TS_f}{TS_i} * 100 \quad (2)$$

ED = eficiência de desaguamento (%);

TS_i = teor de sólidos inicial;

TS_f = teor de sólidos final

A eficiência de desaguamento é utilizada como medida da capacidade do tubo geotêxtil em drenar o líquido do resíduo em suspensão.

5.4.3 Aceleradores de desidratação

Para ser eficiente, o desaguamento deve reter grande parte de sólidos e matéria orgânica e permitir o escoamento da água em um período de tempo relativamente curto. Para maximizar esses processos são empregados aceleradores de desidratação (LAWSON, 2008).

Os agentes flocculantes químicos têm sido utilizados na desidratação de resíduos de ETAs. São introduzidos e misturados no resíduo antes de ser destinado ao tubo geotêxtil.

Além de acelerar o processo de desaguamento, o uso de flocculantes químicos permite conter contaminantes no tubo geotêxtil, não permitindo sua saída com a água efluente. Se o produto for eficiente na desestabilização das partículas, pode-se reter metais pesados e compostos não solúveis, melhorando a qualidade do líquido desaguado (LAWSON, 2008).

Realí (1999) cita que soluções de polímeros sintéticos são amplamente utilizados nas etapas de adensamento e desidratação de resíduos de ETAs. Estes polímeros são classificados em três categorias, conforme a carga apresentada por suas moléculas no meio aquoso. Os polímeros catiônicos são carregados positivamente, os não-iônicos não possuem carga elétrica e o aniônico possui carga elétrica negativa.

A eficiência do condicionamento com polímero é em função dos seguintes fatores: dosagem de polímero, tempo de mistura e gradiente médio de velocidades (HAAK, 2011).

A escolha do melhor polímero que se adeque ao sistema de desaguamento pode ser feita por meio de ensaios experimentais de filtração em pequena escala ou testes de desaguamento em tubos geotêxteis (LAWSON, 2008).

5.4.4 Ensaios para avaliação do desempenho do desaguamento em geotêxtil

Embora o geotêxtil tenha sido utilizado por diversas indústrias, a de desaguamento não tem uniformidade em padrões de testes (GRZELAK *et al.*, 2011). A escolha do tratamento deve ser feita após análise de resultados em laboratório, seja em bancada e/ou em escala piloto, contendo amostras representativas do resíduo.

Os parâmetros mais relevantes obtidos nos ensaios são: teor de sólidos final no resíduo retido no geotêxtil, tempo necessário para desaguamento e qualidade do efluente. (MAURER, 2011). A necessidade de acelerar o processo de desaguamento faz com que polímeros sintéticos sejam usados com o objetivo de condicionar o resíduo à formação de flocos e maximizar a retenção de sólidos.

A escolha do agente coagulante e sua concentração são peculiares a cada material a ser utilizado, sendo também avaliados nos testes em pequena escala (GRZELAK *et al.*; 2011).

Dentre os testes de avaliação do desempenho do desaguamento de resíduos em geotêxtil, os ensaios de bancada mais utilizados incluem os testes de cone e os testes de filtro pressurizado (GRZELAK *et al.*; 2011).

O primeiro é um ensaio simples, que permite inicial análise do teor de sólidos retido no geotêxtil e a qualidade do efluente. É necessário um corpo-de-prova de geotêxtil, que seja dobrado na forma de cone, um suporte para o geotêxtil e recipiente para coleta do material desaguado. Consiste em verter a mistura de aproximadamente 500 mL sob o filtro de cone de geotêxtil e registrar o tempo para a água livre fluir através do filtro, conforme Figura 11 (TOMINAGA, 2010; SILVA, L., 2017).

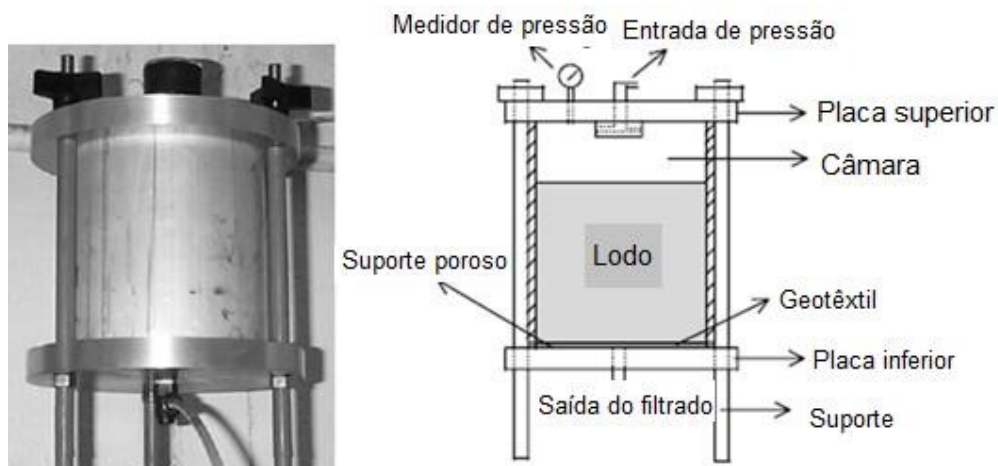
Figura 11 - Montagem do ensaio de cone em geotêxtil



Fonte: Lawson (2008)

Nos ensaios de filtração pressurizados realizados por Moo-Young *et al.* (2002), o equipamento era composto por três partes: câmara, placa superior com uma entrada de pressão aplicada e um manômetro e placa inferior com suporte de geotêxtil. A Figura 12 apresenta o sistema utilizado pelos autores.

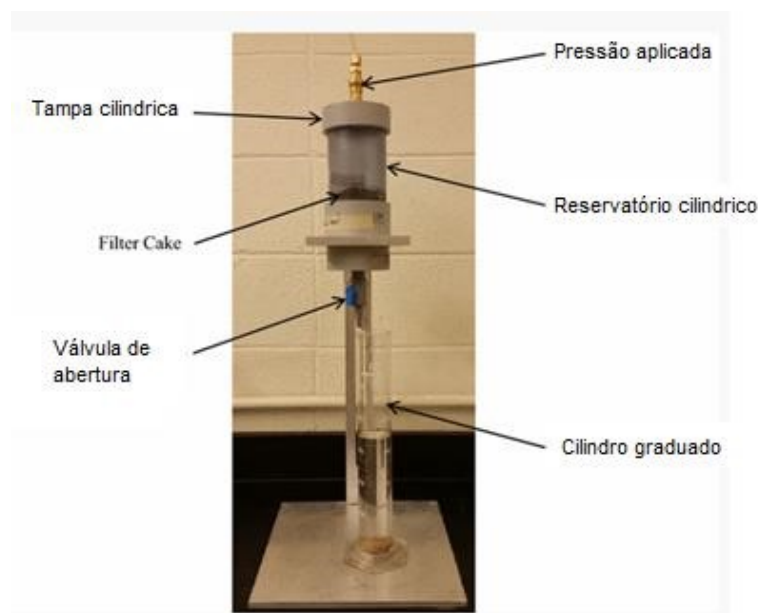
Figura 12 - Aparelho do teste de filtração pressurizado



Fonte: Moo-Young *et al.* (2002)

O modelo utilizado por Spritzer, Khachan e Bathia (2015) contém as mesmas partes que o proposto por Moo-Young *et al.* (2002): recipiente cilíndrico, placa de base com geotêxtil e tampa com uma entrada para a pressão. Conta, ainda, com um cilindro graduado imediatamente abaixo do geotêxtil, para medição do volume escoado. O modelo de aparelho pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 - Modelo de aparelho utilizado por Spritzer, Khachan e Bathia (2015)



Fonte: Spritzer *et al.* (2015)

Grzelak *et al.* (2011) testaram os dois tipos de ensaios em mesmo tipo de geotêxtil e resíduo. O teste pressurizado mostrou alta velocidade de desaguamento inicial antes da formação do *filter cake*, enquanto no teste de queda a porcentagem de volume filtrado em relação ao inicial na pasta foi inferior, além de necessitar de maior tempo para desaguamento. Em termos de eficiência de filtração, o teste de queda apresentou melhores resultados, porém menor percentual de eficiência de desaguamento. Os resultados do teste de queda foram os que mais se distanciaram dos valores encontrados pelos ensaios de média escala (teste de bolsa suspensa e teste de bolsa de pequena dimensão).

Foi observado também que a presença de pressão no ensaio aumenta a taxa de escoamento, criando condições menos favoráveis para formação do *filter cake* (GRZELAK *et al.*; 2011).

5.5 Legislação ambiental sobre resíduos de ETAs

A Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 estabelece competências para que a população tenha direitos sociais e garantias, tal como acesso ao saneamento básico. Por meio do art. n° 21, inciso XIX, fica delegado à União instituir o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios de outorga de direitos de seu uso (BRASIL, 1988). Por conta disto, foi promulgada a Lei n° 9.433 em 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

A utilização da água, como definido pelo art. n° 1, inciso I da Lei n° 9.433/1997, é um bem de domínio público. Dentre os objetivos da PNRH, tem-se: “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos”.

Atualmente o Sistema Nacional de Meio Ambiente (Sisnama) é a estrutura responsável pela gestão ambiental no Brasil, formada por órgãos e entidades da União, dos Estados e Municípios. Cabe ao Sisnama preservar, melhorar e recuperar a qualidade ambiental no país.

A Portaria de Consolidação n°5 de 2017, do Ministério da Saúde, consolida normas sobre as ações e serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. No anexo XX está incorporado o conteúdo referente a água para consumo humano e padrões

de potabilidade, anteriormente definidos pela Portaria nº 2.914 de 2011, do Ministério da Saúde.

O art. 3º do anexo XX estabelece que toda água destinada para consumo humano, distribuída coletivamente deve ser objeto de controle e vigilância da qualidade (BRASIL, 2017).

Para atender ao padrão de potabilidade, a água deve passar por uma série de processos físicos, químicos e microbiológicos, em conformidade com os valores permitidos exibidos nos anexos presentes no anexo XX da Portaria de Consolidação nº5. Para que ocorra a transformação da água bruta, torna-se necessária a implantação de uma estação de tratamento de água.

Os resíduos gerados pelas ETAs devem ser tratados para que possam ser descartados adequadamente. De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os lodos oriundos dos sistemas de tratamento de água são classificados como resíduos sólidos, não sendo possível o seu lançamento *in natura* em redes coletoras de esgotos ou corpos d'água. Essa norma classifica os resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais à saúde pública e ao meio ambiente, para que possam ser gerenciados adequadamente.

Os resíduos de estações de tratamento de água devem estar em conformidade com a Lei nº 12.305/2010, que traz a seguinte definição no Art. 3º:

Art. 3º Para os efeitos desta Lei, entende-se por:

VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

Ainda na Lei nº 12.305/2010, Art.3º, inciso VIII, a disposição final ambientalmente adequada de rejeitos é em aterros, sendo os rejeitos os resíduos sólidos após tratamento e recuperação.

A Lei nº 9.605/1998, chamada de lei de crimes ambientais, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. É considerado crime ambiental a poluição que possa causar danos à saúde humana, que provoque a mortandade de animais ou a destruição da flora. Conforme descrito no Art. 54, parágrafo 2, inciso V, a poluição pode ser proveniente do lançamento de resíduos, líquidos ou gasosos em desacordo com exigências

estabelecidas por leis e regulamentos, com pena de reclusão prevista de um a cinco anos.

As condições e padrões de qualidade de corpos hídricos são prescritas pela Resolução CONAMA n° 357/2005. Os corpos de água são classificados conforme a qualidade necessária para seu uso preponderante. São estabelecidos os valores máximos permitidos para cada parâmetro de análise em concordância com a classe de enquadramento.

A Resolução CONAMA n°430/2011 dispõe sobre as condições de e padrões de lançamento de efluentes. O lançamento dos efluentes em corpos receptores somente poderá ser efetuado após tratamento que os torne adequados de acordo com as condições previstas nesta resolução. Os parâmetros de lançamento do efluente devem satisfazer também os padrões de qualidade do corpo hídrico receptor.

Art. 12. O lançamento de efluentes em corpos de água, com exceção daqueles enquadrados na classe especial, não poderá exceder as condições e padrões de qualidade de água estabelecidos para as respectivas classes, nas condições da vazão de referência ou volume disponível, além de atender outras exigências aplicáveis.

Com base nas legislações brasileiras expostas, os resíduos das estações de tratamento de água, tanto sólidos quanto líquidos, devem ser tratados antes do seu descarte para que sejam minimizados os impactos ambientais. As legislações estaduais devem ser consultadas, pois podem ser mais restritivas que as nacionais.

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para obtenção dos resultados e discussões do trabalho experimental. O resíduo utilizado para esta pesquisa foi cedido pela BRK Ambiental, proveniente do decantador da ETA 006, localizado na cidade de Palmas – TO (Figura 14).

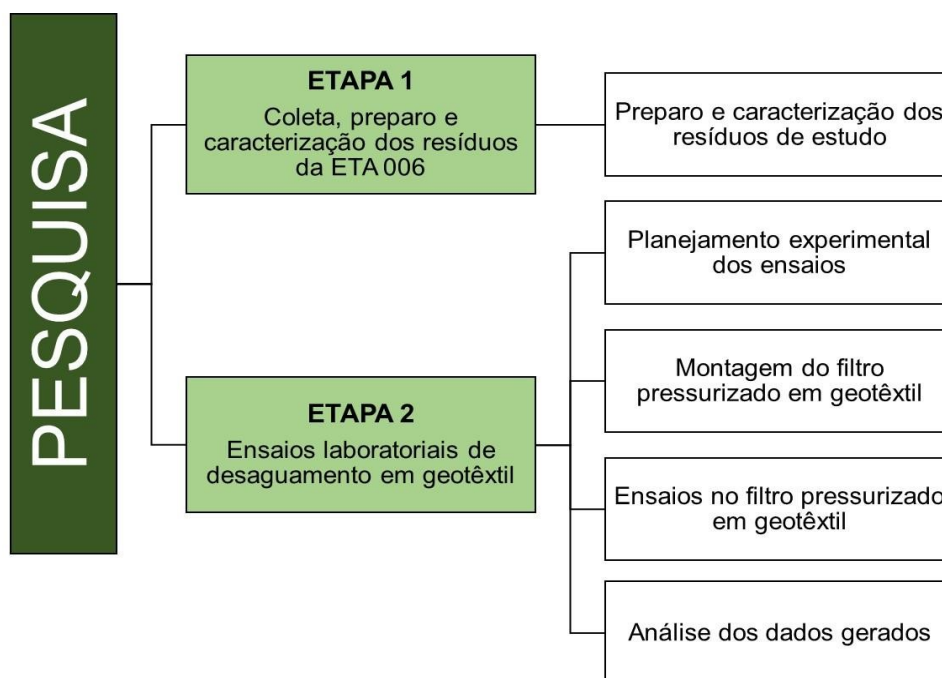
Figura 14 - ETA 006



Fonte: Autor (2018)

Conforme fluxograma da Figura 15, o trabalho foi dividido em duas etapas. A primeira consistiu na coleta, preparo e caracterização dos resíduos gerados a partir da estação de tratamento de água. Na segunda etapa foram realizados os ensaios laboratoriais de desaguamento em geotêxtil com os resíduos preparados, de acordo com o planejamento estatístico experimental.

Figura 15 - Fluxograma com etapas da pesquisa



Fonte: Autor (2018)

6.1 Equipamentos e materiais

- Geotêxtil a ser utilizado nos ensaios

As propriedades físicas do geotêxtil utilizado nos ensaios são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades físicas do geotêxtil

Propriedades	
Matéria-prima	Polipropileno
Massa por unidade de área	445 g/m ²
Resistência a tração nominal	≥ 105 kN/m
Deformação na resistência nominal	≤ 9%
Permeabilidade	25.10 ⁻³ m/s
Tamanho da abertura	200 µm

Fonte: Huesker (2018)

- Polímero sintético a ser usado como condicionante químico nos ensaios

Os polímeros sintéticos são os catiônicos, não-iônicos e aniônicos, no estado físico sólido granulado e com alto peso molecular.

- Equipamentos utilizados na pesquisa

Na Tabela 5 são apresentados os equipamentos necessários para realização dos ensaios e sua função na pesquisa.

Tabela 5 - Equipamentos utilizados na pesquisa

Equipamentos	Função
Jarteste, Nova Ética – modelo LDB 6	Ensaio de floculação
Analizador de Carbono Orgânico Total TOC-L – marca SHIMADZU	Análise de carbono orgânico total
Balança eletrônica BL 210 S – marca Sartorius	Pesagem de produtos químicos
Cronômetro Mondaine Stop Watch	Medição do tempo
Espectrofotômetro de leitura direta, modelos DR/2000, DR/2500 – marca Hach	Leitura de cor aparente
Espectrofotômetro de absorção atômica, modelo AA – Analyst 700 – marca Perkin Elmer	Análise de metais
pHmetro (potenciômetro), modelo 230 – marca Orion	Leitura de pH
Turbidímetro nefelométrico, modelo 2100P – marca Hach	Leitura da turbidez
Conjunto moto-bomba: 2 cv, monobloco da marca NETZSCH Modelo NM031 1.710 RPM, 60 HZ vazão: 80 m ³ /h com inversor de frequência	Bombeamento do resíduo
Reservatórios de 2000, 1000 e 500 L	Armazenamento de resíduo
Master Sizer 2000 Marca Malvern	Distribuição de tamanho de partículas do resíduo
Disco e bolsa geotêxtil	Filtração
Quanta 650 FEG e MED020 (Bal-tec)	Microscopia eletrônica de varredura e microanálise química

Fonte: Autor (2018)

- Parâmetros, métodos e limites de medição

Na Tabela 6 temos os parâmetros físico-químico, unidades, métodos de medição e limites de detecção realizados segundo os métodos indicados no APHA (2012).

Tabela 6 - 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 – NPOC	0,1
Carbono orgânico dissolvido	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo – NPOC	0,1
Distribuição e tamanho das partícula	mm	Espalhamento de luz laser de baixo angulo	0,02
Ferro	mg/L Fe	EAA - Chama	0,01
Manganês	mg/L Ma	EAA - Chama	0,01
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
Teor de sólidos	%	Gravimétrico	1
Turbidez	uT	Nefelométrico	0,1
Umidade	%	Gravimétrico	1

Fonte: Autor (2018)

6.2 Coleta, preparo e caracterização dos resíduos de estudo

O resíduo de estudo foi coletado durante os dias 10 e 13 de abril de 2018, na tubulação de descarga do decantador I da ETA 006 e preparado em quantidade suficiente para realização dos ensaios. As etapas de preparo são as seguintes:

1. Coleta do resíduo e armazenamento em reservatório de 2000 L;
2. Repouso do resíduo por período de 24h;
3. Após sedimentação, sifonação do líquido sobrenadante;
4. Repetição das etapas 1, 2 e 3 até obtenção de 2000 L de resíduo com concentração mínima de 100 g/L, denominado “Resíduo mãe”.

Na Figura 16 é apresentada a coleta do resíduo da ETA 006 para preparo do “Resíduo Mãe”. Na Figura 17 temos o “Resíduo Mãe” armazenado.

Figura 16 - Coleta do resíduo pela tubulação de descarga do decantador



Fonte: Autor (2018)

Figura 17 - "Resíduo Mãe" armazenado em reservatório

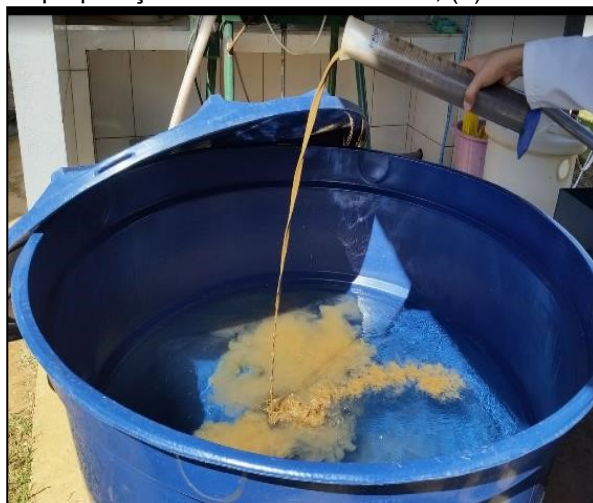


Fonte: Autor (2018)

Para realização dos ensaios de desaguamento pressurizados, foi retirado o volume de 800 L do “resíduo mãe” e encaminhado ao laboratório de Saneamento (IFTO – Palmas/TO).

Posteriormente, as amostras do “resíduo mãe” foram homogeneizadas e diluídas em água filtrada, a fim de se obter o SST dos resíduos de estudo: 0,25 g/L, 10,13 g/L e 20 g/L, denominadas como pontos -1 (RE 1), 0 (RE 2) e 1 (RE 3), respectivamente (Figura 18).

Figura 18 – Preparo dos resíduos de estudo: (a) Diluição do “Resíduo Mãe” em água filtrada para preparação do resíduo de estudo; (b) Concentrações dos três resíduos de estudo preparados



(a)



(b)

Fonte: Autor (2018)

6.3 Ensaios de bancada em geotêxtil

6.3.1 Planejamento estatístico experimental

Buscando otimização do tempo e o rendimento dos ensaios e obter maior precisão nos resultados, foi utilizado como ferramenta o Planejamento Experimental (*Design of Experiments*, DOE).

O tipo de planejamento aplicado depende principalmente do número de fatores adotados. Rodrigues e lemma (2014) citam que ao utilizar duas ou três variáveis independentes, é recomendado utilizar como planejamento experimental o delineamento do composto central (DCC) e suas variantes, dentre elas o delineamento de faces centradas (DFC).

Nessa investigação inicial foram consideradas que os delineamentos de face centradas (DFC) seriam de duas variáveis independentes que podem interferir no desaguamento: SST do resíduo (X_1) e dosagem de polímero (X_2). Os níveis das variáveis estudadas estão descritos na Tabela 7. Como seriam testados três tipos de polímeros (catiônico, aniônico e não iônico), foi feito um DFC para cada tipo de polímero.

Para a variável X_1 , sólidos suspensos totais, foram considerados três níveis. O nível máximo (+1) foi de 20 g/L, valor característico da descarga dos decantadores. O nível intermediário (0) foi de 10,13 g/L, representando o valor da

mistura da água de lavagem dos filtros com resíduos de decantadores. O nível mínimo (-1) foi de 0,25 g/L, sendo o valor característico da água de lavagem dos filtros.

Para a variável X_2 , dosagem de polímero, também foram adotados três níveis. Seus valores foram baseados na literatura. O nível máximo foi de 2,5 mgPol/gSST, o mínimo de 0,5 mgPol/gSST e o médio foi de 1,5 mgPol/gSST.

Tabela 7 - Níveis dos fatores empregados no planejamento experimental de faces centradas (DFC) nos ensaios em sistema pressurizado

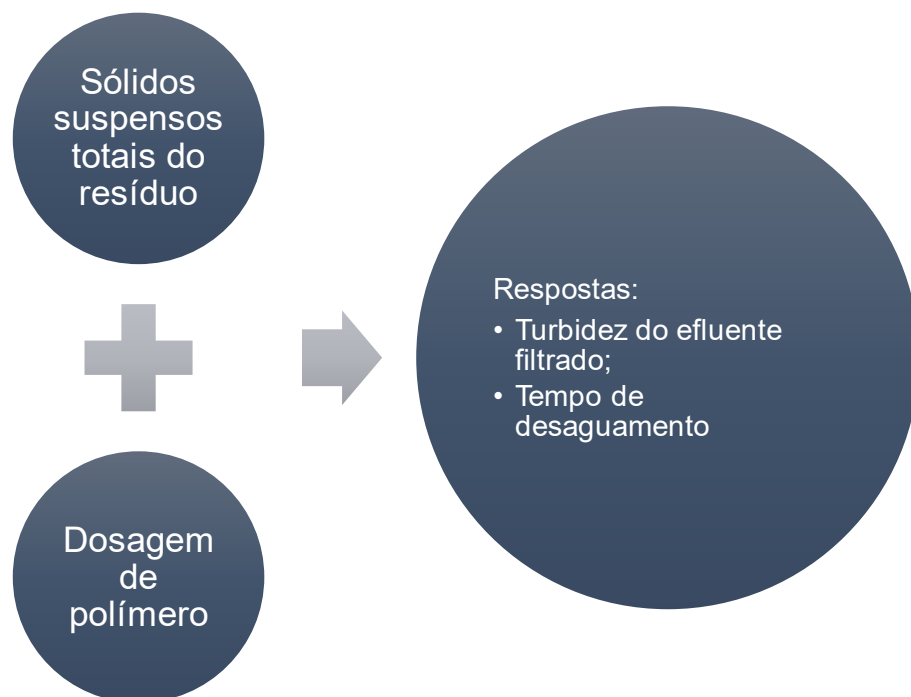
Nome da Variável	Código	Nível		
		-1	0	1
SST do resíduo (g/L)	x_1	0.25	10.13	20
Dosagem de polímero (mgPol/gSST)	x_2	0.5	1.5	2.5

Fonte: Autor (2018)

Temos um planejamento com duas variáveis independentes em três níveis. Cada DFC totalizou 11 ensaios, sendo três repetições no ponto central (0). A Tabela 8 mostra o delineamento para o DFC.

Como resposta dos planejamentos, as análises dos ensaios de desaguamento foram avaliadas por meio dos resultados da turbidez do efluente filtrado e do tempo de desaguamento do filtrado, representadas pela Figura 19.

Figura 19 - Representação do planejamento no sistema de filtração pressurizado em geotêxtil



Fonte: Autor (2019)

Tabela 8 - Experimentos realizados utilizando delineamento de face centrada (DFC) nos ensaios em sistema pressurizado em geotêxtil

Ensaio	Fatores	
	X ₁ SST do resíduo (g/L)	X ₂ Dosagem de polímero (mgPol/gSST)
1	-1(0,25)	-1(0.5)
2	1(20)	-1(0.5)
3	-1(0,25)	1(2.5)
4	1(20)	1(2.5)
5	-1(0,25)	0(1.5)
6	1(20)	0(1.5)
7	0(10.13)	-1(0.5)
8	0(10.13)	1(2.5)
9	0(10.13)	0(1.5)
10	0(10.13)	0(1.5)
11	0(10.13)	0(1.5)

Fonte: Autor (2018)

O volume de polímero utilizado em cada ensaio planejado é em função dos sólidos suspensos totais iniciais do resíduo e da dosagem do polímero, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Volume de polímero em ensaios em sistema pressurizado em geotêxtil

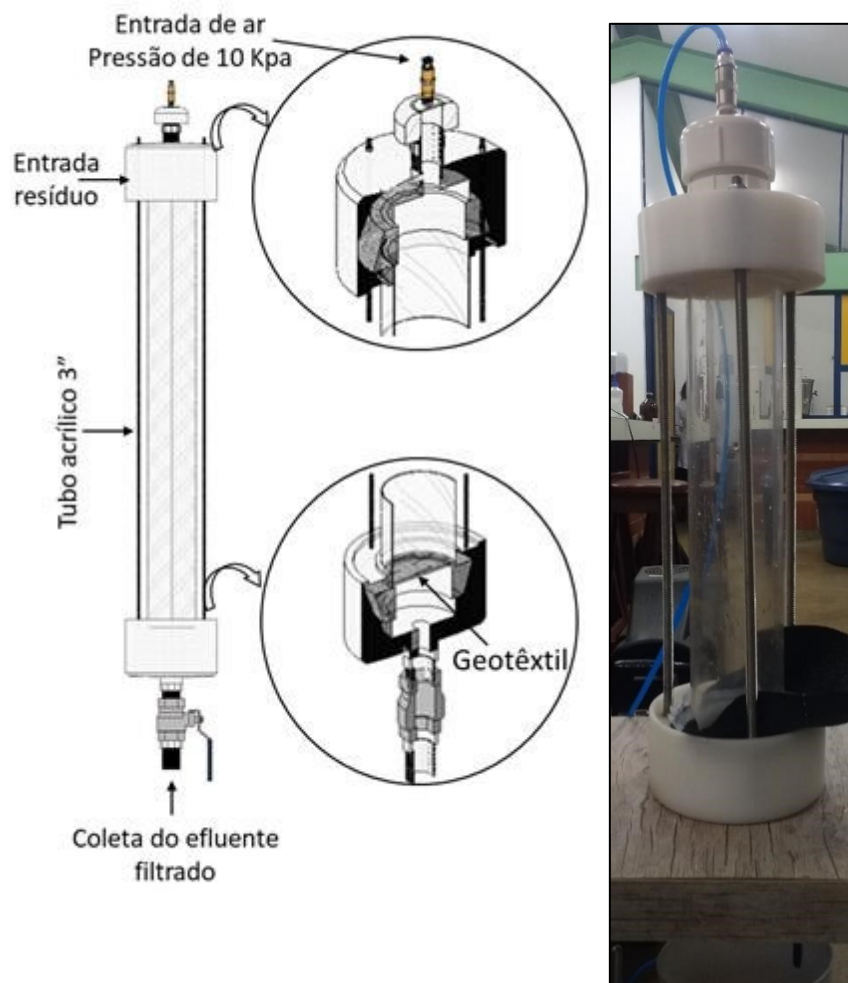
Ensaio Planejado	SST do resíduo (g/L)	Dosagem Polímero (mg P / g SST)	Volume de Polímero (mL) 0,1 %
1	0,25	0,50	0,1
2	20,00	0,50	5,0
3	0,25	2,50	0,3
4	20,00	2,50	25,0
5	0,25	0,50	0,1
6	20,00	0,50	5,0
7	0,25	2,50	0,3
8	20,00	2,50	25,0
9	10,13	1,50	7,6
10	10,13	1,50	7,6
11	10,13	1,50	7,6

Fonte: Autor (2018)

6.3.2 Montagem do filtro pressurizado em geotêxtil

O ensaio de filtração com pressão em geotêxtil foi adaptado da metodologia adotada por Khachan e Bhatia (2017). O sistema consiste em um tubo acrílico (diâmetro de 7,6 cm e altura de 50 cm), entre dois flanges de tecnil nylon. Há um suporte na base que permite a coleta do líquido desaguado, no qual é acoplado o disco de geotêxtil e acima deste o flange inferior juntamente com um anel de borracha, proporcionando vedação. A parte superior possui uma abertura roscável que permite a introdução do resíduo preparado (Figura 17). A pressão é aplicada na parte superior, através de uma mangueira de ar comprimido. Seu valor foi definido em 10 kPa, por simular as condições operacionais em escala real (Maurer, 2011).

Figura 20 - Filtro pressurizado em geotêxtil utilizado



Fonte: Autor (2018)

6.3.3 Ensaio no filtro pressurizado em geotêxtil

Os ensaios no filtro pressurizado em geotêxtil obedeceram a seguinte sequência:

1. Os resíduos de estudo preparados, com concentrações de SST de 20 g/L, 10,13 g/L e 0,25 g/L, conforme descrito no item 6.2. Foram homogeneizados e coletado o volume de 500 mL, obedecendo a sequência dos onze ensaios do planejamento estatístico. O armazenamento se deu em jarros do equipamento *jarteste* e em provetas, conforme Figura 21;

Figura 21 - Resíduos coletados para início dos ensaios



Fonte: Autor (2018)

2. A preparação do condicionante químico se deu pela pesagem de 1g do polímero a ser utilizado (Figura 22) e separação de 1000 mL de água destilada. Foi feita a mistura no equipamento *jarteste* até a obtenção de uma solução homogênea, conforme apresentado na Figura 23. O polímero foi, então, armazenado em garrafas plásticas;

Figura 22 - Separação do polímero para preparação do condicionante químico



Fonte: Autor (2018)

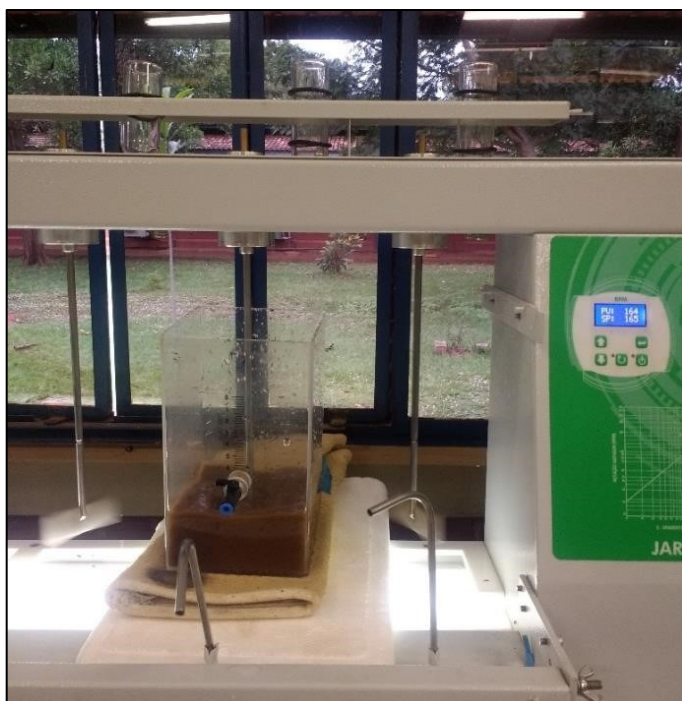
Figura 23 - Preparação do polímero para ensaio



Fonte: Autor (2018)

3. Para cada amostra de resíduo separada, foram realizados ensaios em *jarteste* variando-se as dosagens dos condicionantes químicos (polímeros sintéticos aniônico, catiônico e não iônico), com gradiente de mistura de 200 s^{-1} e tempo de mistura do polímero de 60 segundos. O processo é mostrado na Figura 24;

Figura 24 - Preparação resíduo com condicionante químico



Fonte: Autor (2018)

4. Após a mistura no *jarteste*, o resíduo é despejado no filtro pressurizado, mantendo o registro de saída fechado. Rosqueia-se a parte superior do filtro e é inserida a mangueira de ar comprimido (Figura 25).

Figura 25 - Resíduo no filtro pressurizado



Fonte: Autor (2018)

5. O desaguamento se inicia após abertura do registro de saída na parte inferior do sistema. Inicialmente são coletados volumes do filtrado a cada 10 segundos, aumentando este intervalo à medida que diminui a vazão de desaguamento;
6. O ensaio finaliza quando a vazão de desaguamento for inferior a 0,0025 mL/segundo (inferior a 1 gota a cada 20 segundos) (Maurer, 2011);
7. Após o término do ensaio são realizadas as análises de turbidez e sólidos suspensos totais no efluente filtrado e no resíduo retido no geotêxtil os ensaios são teor de sólidos e umidade. O resíduo retido no geotêxtil e o filtrado são apresentados nas Figuras 26 e 27, respectivamente.

Figura 26 - Resíduo retido no geotêxtil



Fonte: Autor (2018)

Figura 27 - Resíduo filtrado



Fonte: Autor (2018)

6.3.4 Análise dos resultados dos ensaios pressurizados

Utilizando o Delineamento de Face Centrada, foi verificado, estatisticamente, a influência no resíduo de estação de tratamento de água utilizando dois fatores: sólidos suspensos totais do resíduo e dosagem do polímero. Para tratamento dos dados gerados pelos ensaios, foi utilizado o software *Protimiza Experimental Design*, sendo possível obter o grau de significância de cada variável (p-valor).

Quando apresentada significância estatística para alguma variável, o software elaborou um modelo matemático, com os coeficientes das variáveis sobre as respostas. Cada modelo matemático foi submetido a análise de variância (ANOVA), em que se verifica se o modelo é estatisticamente significativo.

Após validação do modelo matemático pela ANOVA, foram gerados os gráficos de superfície de resposta para cada índice de desempenho.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de desaguamento. Em 7.1 temos os resultados das caracterizações dos resíduos e em 7.2 são apresentados os resultados do ensaio de desaguamento pressurizado em geotêxtil.

7.1 Preparo e caracterização dos resíduos de estudo

A Tabela 10 apresenta o volume utilizado do “Resíduo Mãe” e de água filtrada da ETA 006 para preparo e obtenção das concentrações dos resíduos de estudo utilizados. Foram preparados 800 L de cada resíduo de estudo. São indicadas as quantidades utilizadas do “Resíduo Mãe” e respectivos volumes de água filtrada para diluição e preparo do resíduo de estudo.

Tabela 10 - Volume de resíduos preparados de acordo com o “Resíduo Mãe”

Resíduo de Estudo	SST do Resíduo Mãe	Volume necessário	Diluição com o resíduo Mãe	Resíduo Mãe	Água filtrada da ETA 006
(g/L)	(g/L)	(L)	(L)	(L)	(L)
0,25	181,6	800	726,4	1,1	798,9
10,13		800	17,71	45,15	754,8
20		800	9,08	88,11	712

Fonte: Autor (2019)

A Tabela 11 mostra os resultados dos parâmetros físico-químico do “Resíduo Mãe” e de três amostras preparadas para os resíduos de estudo. Com os valores obtidos é possível verificar que com o incremento de SST nos resíduos houve o aumento dos parâmetros turbidez, ST e manganês. Tem-se que os valores de SST e ST são próximos, fato justificado pela maior parte da matéria presentes nos resíduos estar em suspensão, conforme explica Guimarães (2007).

Pode-se observar que para os três resíduos preparados e o “Resíduo Mãe” há pouca variação de pH, de 6,23 a 6,89, estando dentro da faixa definida por Richter (2001 apud Andreoli et al., 2003) para resíduos com o sulfato de alumínio como coagulante, na faixa de 6 – 8.

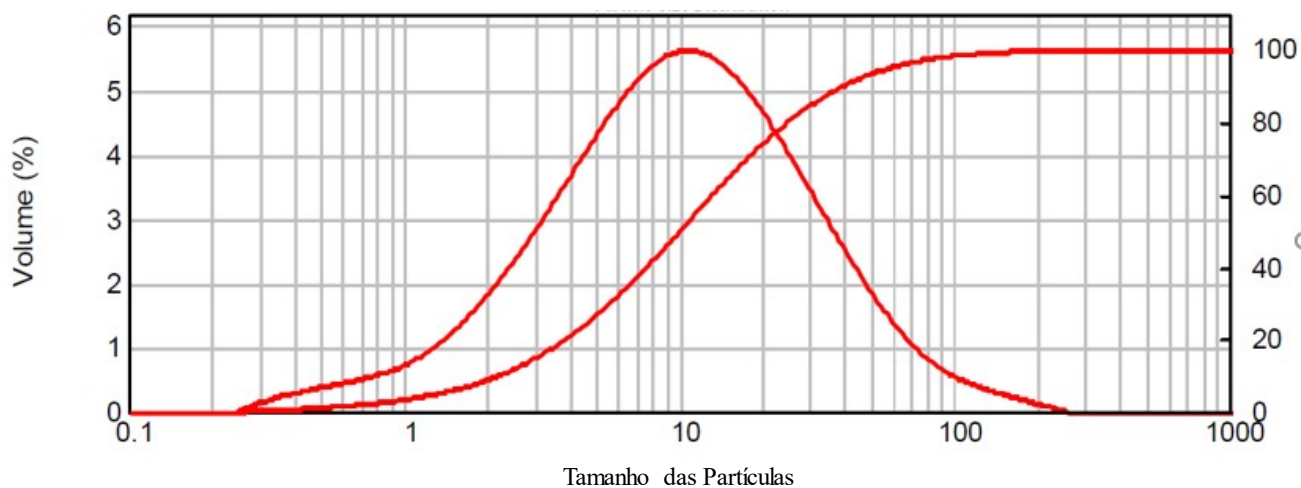
Tabela 11 - Parâmetros físico-químicos dos resíduos de estudo

Parâmetro	Resíduo Mãe	RE 1 0,25 g/L	RE 2 10,13 g/L	RE 3 20 g/L
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	121,12	46,97	45,9	46,12
Manganês (mg/L)	17,3	<0,010	1,99	5,01
pH (-)	6,89	6,24	6,47	6,23
SST (g/L)	122,71	0,24	9,9	20,5
STD (g/L)	0,268	0,178	0,121	0,169
ST (g/L)	122,97	0,41	9,64	23,11
COT (mg/L)	5,761	4,068	3,968	5,841
COD (mg/L)	3,303	3,568	3,864	3,78
Turbidez (uT)	118.200	305	14.350	32.550

Fonte: Autor (2019)

A Figura 28 apresenta a curva granulométrica do “Resíduo Mãe”, coletado do decantador da ETA 006 entre os dias 10 e 13 de abril de 2018. Os resultados apontam que o resíduo apresenta 15% de fração de argila ($< 2 \mu\text{m}$), 55% de fração silte ($2 < x < 60 \mu\text{m}$) e 30% de fração areia fina ($60 < x < 200 \mu\text{m}$).

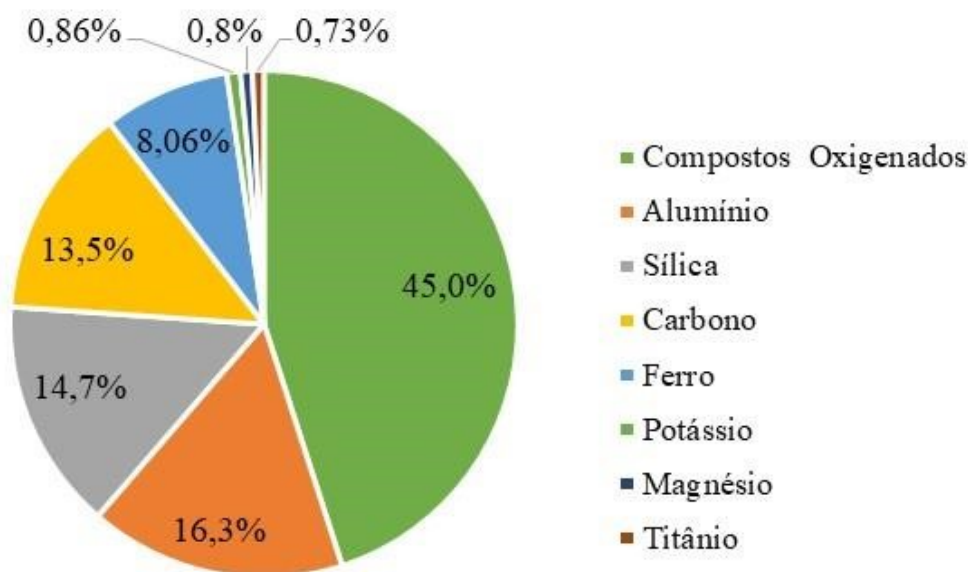
Figura 28 - Curva granulométrica do “Resíduo Mãe”



Fonte: Autor (2019)

Foi realizada uma análise qualitativa dos elementos que constituem o “Resíduo Mãe”, por meio do método de Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (EDS). Os resultados são apresentados na Figura 29.

Figura 29 - Análise qualitativa dos elementos químicos constituintes na parte sólida do "Resíduo Mãe"



Fonte: Autor (2019)

No "Resíduo Mãe" há a predominância dos elementos químicos: oxigênio, alumínio, sílica, carbono, ferro, potássio, magnésio e titânio.

A alta porcentagem de compostos oxigenados presentes no resíduo se deve também à formação de compostos do oxigênio com outros elementos, como alumínio (Al), carbono (C), ferro (Fe) e silício (Si). Como exemplo temos o hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), relacionado ao uso do sulfato de alumínio como coagulante no processo de tratamento, e o óxido de silício (SiO_2), encontrado em grãos de areia e em materiais argilosos presentes na água bruta.

O teor de alumínio encontrado no "Resíduo Mãe", de 16,3%, está dentro do intervalo definido por Richter (2001 apud Andreoli et al., 2003), em que diz que resíduos típicos com uso de sulfato de alumínio apresentam esse valor entre 15 e 40%.

7.2 Ensaios laboratoriais de desaguamento em geotêxtil

Foram verificados os fatores de influência no desaguamento do resíduo por meio do Delineamento de Face Centrada (DFC). Para o tratamento estatístico, considerou-se um nível de significância de 10% e nível de confiança de 90%, de modo que os valores de regressão com p-valor abaixo de 0,10 foram considerados estatisticamente significativos na resposta.

Nas Tabelas 12, 13 e 14 são apresentados os resultados da matriz de ensaio, com o valor real das variáveis estudadas entre parênteses, além dos dados obtidos da turbidez do efluente filtrado e o tempo de desaguamento, para os três polímeros de estudo.

Nos resultados obtidos dos ensaios realizados com o polímero catiônico, apresentados na Tabela 12, temos destacados em vermelho os resultados mais desfavoráveis e de verde os mais favoráveis. O pior resultado das variáveis foi obtido no ensaio 2, com SST de 20 g/L e dosagem de polímero de 0,5 mgPol/gSST, com turbidez do filtrado com 4.160 uT e tempo de desaguamento de 3.475 s. Já a melhor resposta foi com o ensaio 3, utilizando resíduo com SST de 0,25 g/L e dosagem de polímero de 2,5 mgPol/gSST, obtendo filtrado com 85,63 uT no tempo de 94 s.

Tabela 12 - Resultados de turbidez do filtrado e tempo de desaguamento nos ensaios do delineamento DFC, para o Polímero Catiônico.

Ensaio	Variáveis		Polímero Catiônico	
	SST do resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol /gSST)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo de desaguamento (s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,5)	196,33	115
2	+1 (20)	-1 (0,5)	4160	3475
3	-1 (0,25)	+1 (2,5)	85,63	94
4	+1 (20)	+1 (2,5)	125,50	2186
5	-1 (0,25)	0 (1,5)	174	109
6	+1 (20)	0 (1,5)	148,33	2153
7	0 (10,125)	-1 (0,5)	622,33	2317
8	0 (10,125)	+1 (2,5)	181,67	1432
9	0 (10,125)	0 (1,5)	849	1389
10	0 (10,125)	0 (1,5)	913,33	1181
11	0 (10,125)	0 (1,5)	790,50	1285

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 13, para os dados de ensaios com polímero aniônico, temos que o ensaio 2, com SST inicial do resíduo de 20 g/L e dosagem de polímero de 0,5 mgPol/gSST, apresentou melhor resposta para turbidez do filtrando, com 9,37 uT, entretanto com maior tempo para desaguamento, resultando em 3.032 s. O ensaio 7

apresentou o pior valor de turbidez, com 352,67 uT. O menor tempo de desaguamento ocorreu nos ensaios 1 e 5, em 75 s, ambos com SST inicial do resíduo de 0,25 g/L.

Tabela 13 - Resultados de turbidez do filtrado e tempo de desaguamento nos ensaios do delineamento DFC, para o Polímero Aniônico.

Ensaio	Variáveis		Polímero Aniônico	
	SST do resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol /gSST)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo de desaguamento (s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,5)	135,67	75
2	+1 (20)	-1 (0,5)	9,373	3032
3	-1 (0,25)	+1 (2,5)	94,87	259
4	+1 (20)	+1 (2,5)	82,87	2768
5	-1 (0,25)	0 (1,5)	98,20	75
6	+1 (20)	0 (1,5)	222,67	3770
7	0 (10,125)	-1 (0,5)	352,67	2538
8	0 (10,125)	+1 (2,5)	55,57	821
9	0 (10,125)	0 (1,5)	53,97	980
10	0 (10,125)	0 (1,5)	75,30	1013
11	0 (10,125)	0 (1,5)	85,13	880

Fonte: Autor (2019)

Para os ensaios com polímero não-iônico, apresentados na Tabela 14, temos que o valor de turbidez mais desfavorável ocorreu no ensaio 7, obtendo filtrado com 13.635 uT, com SST inicial de 10,125 g/L e dosagem de polímero de 0,5 mgPol/gSST. Já o menor valor de turbidez e de tempo de desaguamento foi encontrado no ensaio 3, com SST do resíduo de 0,25 g/L. O maior tempo de desaguamento, de 3.129 s, ocorreu no ensaio 2, com 20 g/L de SST de resíduo e dosagem de polímero de 0,5 mgPol/gSST.

Tabela 14 - Resultados de turbidez do filtrado e tempo de desaguamento nos ensaios do delineamento DFC, para o Polímero Não-lônico.

Ensaio	Variáveis		Polímero Não-lônico	
	SST do resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol /gSST)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo de desaguamento (s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,5)	143,0	85
2	+1 (20)	-1 (0,5)	6630,0	3129
3	-1 (0,25)	+1 (2,5)	89,10	70
4	+1 (20)	+1 (2,5)	5560,00	2630
5	-1 (0,25)	0 (1,5)	115,67	90
6	+1 (20)	0 (1,5)	7235,0	2568
7	0 (10,125)	-1 (0,5)	13635,0	136
8	0 (10,125)	+1 (2,5)	7980,0	932
9	0 (10,125)	0 (1,5)	9920,0	392
10	0 (10,125)	0 (1,5)	5330,0	1780
11	0 (10,125)	0 (1,5)	4970,0	925

Fonte: Autor (2019)

Com os dados obtidos é possível fazer o tratamento estatístico, para os três polímeros de estudo. As Tabelas 15, 16 e 17 mostram o tratamento para os dados de turbidez do filtrado e tempo de desaguamento, para cada polímero. São apresentados os resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão, t calculado e p-valor das respostas turbidez do filtrado e tempo de desaguamento.

Valores de p-valor abaixo de 0,10 apontam que houve efeito estatístico das variáveis (X_1 e X_2) sobre as respostas estudadas, para nível de confiança de 90%.

Na Tabela 15 é apresentado o tratamento estatístico das respostas para o polímero catiônico. Nota-se que a média e os termos lineares e quadráticos do SST inicial do resíduo (X_1) e o termo quadrático da dosagem de polímero (X_2) não foram estatisticamente significativos (p-valor > 0,10) para a turbidez do filtrado. Desse modo, somente o termo linear de X_2 e a interação entre as variáveis X_1 e X_2 são significativos.

Analisando a variável tempo de desaguamento, tem-se que a média, os termos lineares quadráticos das variáveis X_1 e X_2 e a interação entre as duas ($X_1 \cdot X_2$) apresentaram significância estatística (p < 0,10).

Tabela 15 - Resultados estatísticos das respostas turbidez do filtrado e tempo de desaguamento, para o Polímero Catiônico

Polímero Catiônico									
Turbidez do filtrado (uT)					Tempo de desaguamento (s)				
	Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	t calculado	p-valor		Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	t calculado	p-valor
Média	549,958	432,645	1,271	0,260	Média	1338,263	111,150	12,040	0,0001
x_1	662,983	344,309	1,926	0,112	x_1	1249,333	88,456	14,124	0,0000
x_1^2	62,655	529,880	0,118	0,910	x_1^2	-287,158	136,131	-2,109	0,089
x_2	-764,30	344,309	-2,220	0,077	x_2	-365,833	88,456	-4,136	0,009
x_2^2	303,505	529,880	0,573	0,592	x_2^2	456,342	136,131	3,352	0,020
$x_1 \cdot x_2$	-980,95	421,691	-2,326	0,068	$x_1 \cdot x_2$	-317	108,336	-2,926	0,033

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 16 é possível constatar que, para os ensaios com polímero aniônico, não foi apresentado nenhum efeito estatístico das variáveis X_1 e X_2 para remoção de turbidez do filtrado, visto que p-valor < 0,10. Para resposta do tempo de desaguamento, apenas a média e o termo linear da variável X_1 (SST inicial do resíduo) apresentaram significância estatística ($p < 0,10$).

Tabela 16 - Resultados estatísticos das respostas turbidez do filtrado e tempo de desaguamento, para o Polímero Aniônico

Polímero Aniônico									
Turbidez do filtrado (uT)					Tempo de desaguamento (s)				
	Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	t calculado	p-valor		Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	t calculado	p-valor
Média	116,184	62,514	1,859	0,122	Média	1191,526	327,258	3,641	0,015
x_1	-2,30	49,750	-0,046	0,965	x_1	1526,83	260,439	5,863	0,002
x_1^2	-22,811	76,563	-0,298	0,778	x_1^2	380,184	400,807	0,949	0,386
x_2	-44,067	49,750	-0,886	0,416	x_2	-299,500	260,439	-1,150	0,302
x_2^2	20,889	76,563	0,273	0,796	x_2^2	137,184	400,807	0,342	0,746
$x_1 \cdot x_2$	28,575	60,931	0,469	0,659	$x_1 \cdot x_2$	-112,00	318,971	-0,351	0,740

Fonte: Autor (2019)

A Tabela 17 mostra que os resultados p-valor da média e dos termos lineares e quadráticos do SST inicial do resíduo (X_1) foram estatisticamente significativos ($p < 0,10$) para remoção de turbidez com polímero não-iônico. Já para o tempo de

desaguamento, somente a média e o termo linear da variável X_1 apresentaram $p < 0,10$.

Tabela 17 - Resultados estatísticos das respostas turbidez do filtrado e tempo de desaguamento, para o Polímero Não-Iônico

Polímero Não - Iônico									
Turbidez do filtrado (uT)					Tempo de desaguamento (s)				
	Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	t calculado	p-valor		Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	t calculado	p-valor
Média	7716,275	1412,261	5,464	0,003	Média	895,947	294,709	3,040	0,029
x_1	3179,54	1123,909	2,829	0,037	x_1	1347,00	234,536	5,743	0,002
x_1^2	-5505,355	1729,660	-3,183	0,024	x_1^2	637,632	360,943	1,767	0,138
x_2	-1129,817	1123,909	-1,005	0,361	x_2	47,000	234,536	0,200	0,849
x_2^2	1626,811	1729,660	0,941	0,390	x_2^2	-157,368	360,943	-0,436	0,681
$x_1 \cdot x_2$	-254,025	1376,502	-0,185	0,861	$x_1 \cdot x_2$	-121	287,247	-0,421	0,691

Fonte: Autor (2019)

Considerando apenas os parâmetros com significância estatística ($p < 0,10$), foram elaborados modelos matemáticos que expressem a relação entre as variáveis SST inicial do resíduo (X_1) e dosagem de polímero (X_2) e as respostas avaliadas (turbidez do filtrado e tempo de desaguamento).

Após a validação estatística dos modelos matemáticos pela análise de variância (ANOVA), foram gerados gráficos de superfície para cada índice de desempenho. Considerando o grande volume de informações produzidas para validação dos modelos matemáticos, essas informações referentes aos polímeros aniônico e não-iônico são apresentadas no Apêndice A.

As Equações 3 e 4 apresentam os modelos matemáticos reparametrizados da turbidez do filtrado (uT) e tempo de desaguamento (s), considerando somente os parâmetros significativos ($p < 0,10$), para o desaguamento utilizando o polímero catiônico, em função das variáveis estudadas.

$$\text{Turbidez do filtrado (uT)} = 749,68 + 662,98 x_1 - 764,30 x_2 - 980,95 x_1 x_2 \quad (3)$$

$$\text{Tempo de desaguamento (s)} = 1338,26 + 1249,33 x_1 - 287,16 x_1^2 - 365,83 x_2 + 456,34 x_2^2 - 317 x_1 x_2 \quad (4)$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para análise de variância (ANOVA). Nas Tabelas 18 e 19 são apresentadas as análises de variância da turbidez do filtrado e tempo de desaguamento com polímero catiônico.

Na Tabela 18, apresentando a análise de variância da turbidez do filtrado utilizando polímero catiônico, tem-se que o coeficiente de determinação (R^2) foi de 72,21%. Temos que o $F_{\text{calculado}}$ foi significativo estatisticamente ($p = 0,0233$), sendo a relação $F_{\text{calculado}} / F_{\text{tabelado}}$ igual a 1,97.

Tabela 18 - Análise de variância da turbidez do filtrado para desaguamento com Polímero Catiônico

Turbidez do filtrado (uT)					
Fonte da Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalc	p - valor
Regressão	9991260,0	3	3330420	6,06	0,0233
Resíduos	3846049,4	7	549435,6		
Total	13837309,4	10			
Variação explicada (R^2) = 72,21 %. $F_{0,10;3;7} = 3,07$					

Fonte: Autor (2019)

Já na análise de variância para o índice tempo de desaguamento, apresentada na Tabela 19, temos $R^2 = 97,94\%$ de explicação. O $F_{\text{calculado}}$ foi altamente significativo ($p = 0,00032$), sendo 13,8 vezes maior que o F_{tabelado} .

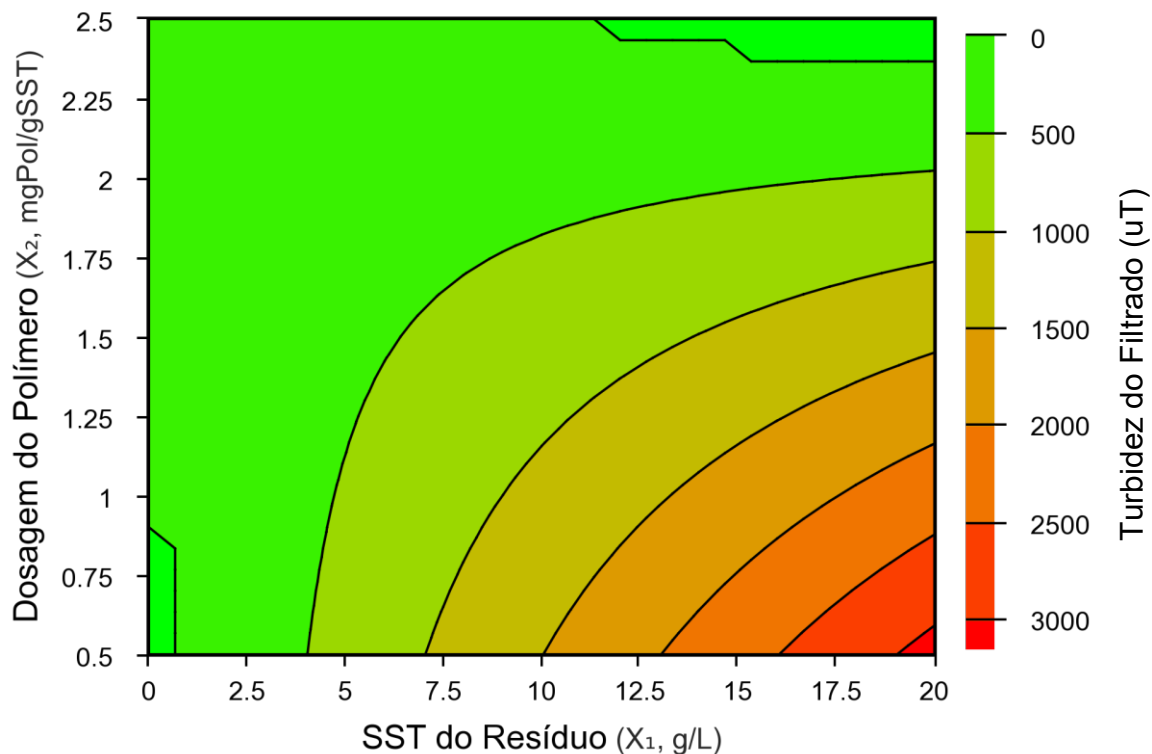
Tabela 19 - Análise de variância do tempo de desaguamento com Polímero Catiônico

Tempo de desaguamento (s)					
Fonte da Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalc	p - valor
Regressão	11172195,3	5	2234439	47,60	0,00032
Resíduos	234733,4	5	46946,68		
Total	11406928,7	10			
Variação explicada (R^2) = 97,94 %. $F_{0,10;5;5} = 3,45$					

Fonte: Autor (2019)

A Figura 30 apresenta a superfície de resposta do índice turbidez do filtrado para o polímero catiônico. Os valores da turbidez estão em função do SST inicial do resíduo (no eixo das abcissas) e dosagem de polímero (no eixo das ordenadas).

Figura 30 - Superfície de resposta da turbidez do filtrado com o Polímero Catiônico



Fonte: Autor (2019)

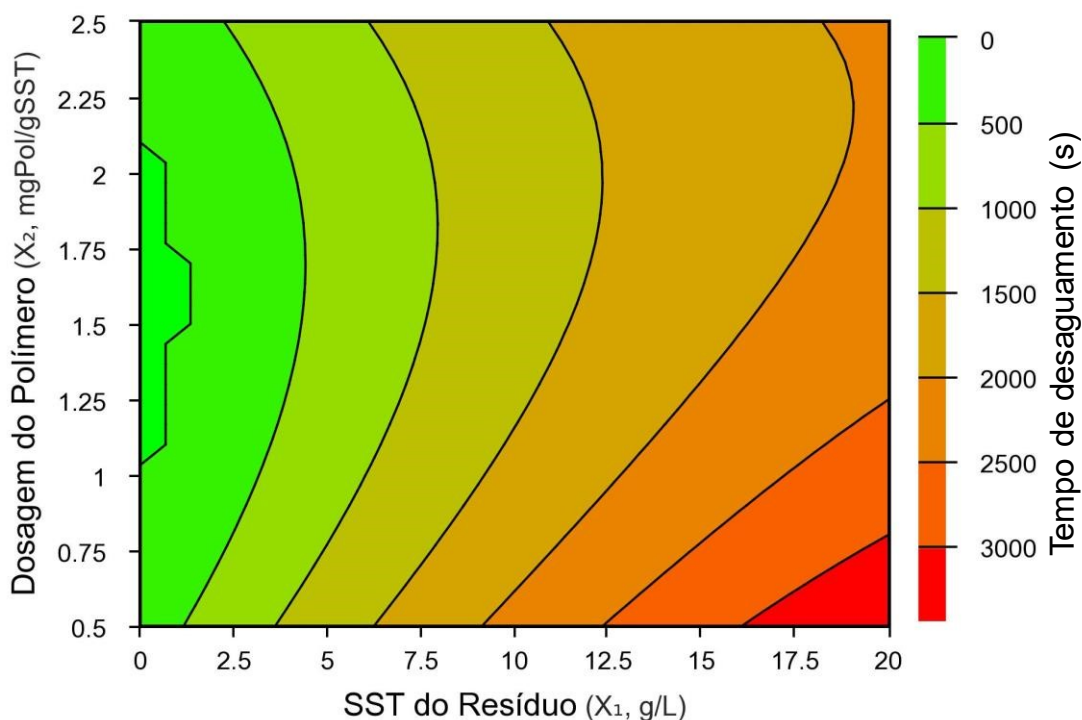
A superfície de resposta apresentada na Figura 30 indica uma tendência de elevação dos valores de turbidez a medida que aumenta o SST do resíduo e diminui a dosagem do polímero. Valores da dosagem do polímero catiônico acima de 1,5 mgPol/gSST e resíduo com SST máximo de aproximadamente 10 g/L indicam remoção de turbidez com a combinação de polímero catiônico.

Dosagens elevadas de polímero promovem a redução da turbidez do filtrado, considerando os diversos valores de SST que o resíduo pode possuir. Do mesmo modo, resíduos com baixos valores de SST (abaixo de 2,5 g/L) proporcionam ao efluente uma menor turbidez, ainda que seja utilizada uma dosagem mínima de polímero.

O valor mínimo de turbidez foi obtido no Ensaio 3, com valor de 85,6 uT, estando o resíduo com SST mínimo, de 0,25 g/L, e dosagem de polímero máximo, de 2,5 mgPol/gSST, se apresentando na faixa entre 0 e 500 uT. Já o valor máximo obtido foi de 4160 uT, com o Ensaio 2, em que temos o SST máximo (20 g/L) em conjunto com a dosagem de polímero de 0,5 mgPol/gSST, compreendido na faixa acima de 3000 uT.

Na Figura 31 temos a superfície de resposta do tempo de desaguamento com o polímero catiônico. Os valores deste índice estão em função do SST inicial do resíduo (no eixo das abcissas) e dosagem de polímero (no eixo das ordenadas).

Figura 31 – Superfície de resposta do tempo de desaguamento com Polímero Catiônico



Fonte: Autor (2019)

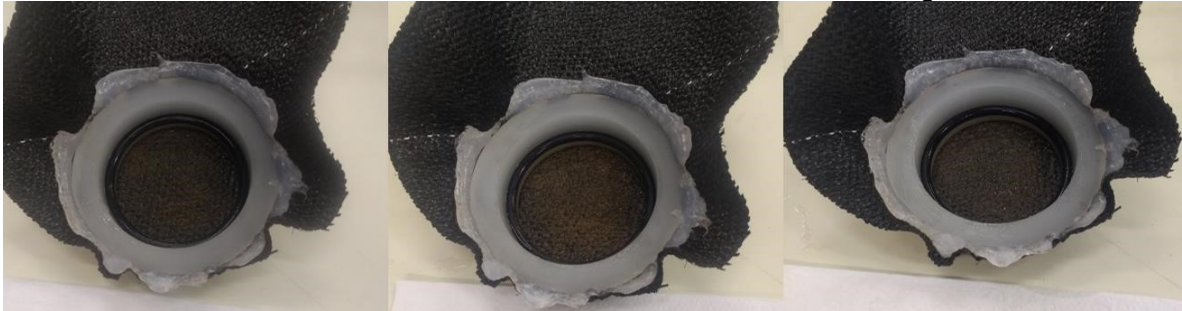
Os resultados apresentados na Figura 31 apontam que a variação de SST do resíduo exerce grande influência no tempo de desaguamento do resíduo. A medida que aumenta o SST, há um incremento no tempo de desaguamento. Os maiores valores do tempo de desaguamento estão próximos do resíduo com teor de SST de 20g/L. Destaca-se, também, que a variação da dosagem do polímero não exerce muita influência no tempo de desaguamento para resíduos com valores de SST iniciais abaixo de 2,5 g/L.

O aumento do tempo de desaguamento relacionado com o aumento do SST inicial do resíduo é explicado pela formação do *filter cake*. Com o acúmulo de material na interface com o geotêxtil, há diminuição da permeabilidade, o que dificulta o escoamento do fluido a ser desaguado, conforme explica Guanaes (2009).

O fenômeno *filter cake* tem influência também na capacidade de retenção das partículas finas, isto porque sua barreira impede a perda de sólidos. Segundo Kutay e Aydilek (2004), resíduos com menor teor de sólidos têm menor capacidade de retenção de partículas finas durante o processo de filtração em geotêxtil.

Na Figura 32 são apresentados os sólidos retidos no geotêxtil após os ensaios pressurizados com polímero catiônico com resíduos de 0,25 g/L de SST inicial, na Figura 33 com SST inicial de 10,125 g/L e na Figura 34 os ensaios com 20 g/L de sólidos iniciais.

Figura 32 - Aspecto do geotêxtil ao final dos ensaios 1, 3 e 5 (esquerda para direita), utilizando Polímero Catiônico, com SST inicial do resíduo de 0,25 g/L



Fonte: Autor (2019)

Figura 33 - Aspecto do geotêxtil ao final dos ensaios 7, 8 e 9 (esquerda para direita), utilizando Polímero Catiônico, com SST inicial do resíduo de 10,125 g/L



Fonte: Autor (2019)

Figura 34 - Aspecto do geotêxtil ao final dos ensaios 2, 4 e 6 (esquerda para direita), utilizando Polímero Catiônico, com SST inicial do resíduo de 20 g/L



Fonte: Autor (2019)

Pela Figura 32 é possível verificar que para resíduos com SST inicial de 0,25 g/L não há a formação de *filter cake*, o que resulta em uma baixa retenção de sólidos, ainda que seja empregada a dosagem de 2,5 mgPol/gSST de polímero, o que justifica também a maior velocidade no tempo de desaguamento. Já para resíduos

com teor de sólidos inicial de 20g/L (Figura 34), há a formação de uma camada espessa de sólidos sobre o geotêxtil e conseqüentemente maior tempo de desaguamento.

Com o resíduo intermediário, com SST inicial de 10,125 g/L, também há retenção de partículas sólidas no geotêxtil, promovendo menor teor de SST no resíduo desaguado, comparado à quantidade inicial (Figura 33).

A Tabela 20 apresenta o teor de sólidos retidos no geotêxtil ao fim do ensaio, para os polímeros catiônico, aniônico e não-iônico.

Tabela 20 - Porcentagem de sólidos retidos em geotêxtil ao fim de ensaios

Ensaio	Sólidos retidos (%)		
	Catiônico	Aniônico	Não - Iônico
1	-	-	-
2	30,6	28,1	32,6
3	-	-	-
4	32,1	15,51	31,26
5	-	-	-
6	30,9	18,7	32
7	26,1	29,7	27,3
8	46,9	28,6	29,8
9	31,7	27,4	28,1
10	30,7	23,4	30,2
11	31,7	28,1	28,8

Fonte: Autor (2019)

Os ensaios 1, 3 e 5 não apresentaram material retido ao final do desaguamento, devido ao baixo teor de SST inicial do resíduo (0,25 g/L), que não permitiu a formação do *filter cake*.

Para o polímero catiônico, o maior teor de sólidos retidos foi obtido pelo ensaio 8, com utilizando o resíduo com SST inicial de 10,125 g/L e dosagem de polímero de 2,5 mgPol/gSST. Para o polímero aniônico, a maior porcentagem obtida foi de 29,7%, pelo ensaio 7, com SST inicial do resíduo de 10,125 g/L e dosagem de polímero de 0,5 mgPol/gSST. Já para o polímero aniônico, a maior retenção foi com o ensaio 2, utilizando resíduo com SST inicial de 20 g/L e dosagem de polímero mínimo 0,5 mgPol/gSST.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos com os ensaios planejados, é possível chegar às seguintes conclusões:

- As variáveis SST inicial do resíduo e dosagem de polímero, para o polímero catiônico, exerceram influência nos resultados da turbidez do filtrado e tempo de desaguamento;
- Para o polímero aniônico, apenas a variável SST inicial do resíduo influenciou os resultados obtidos para tempo de desaguamento. Os valores obtidos da turbidez do filtrado não apresentou interferência dos sólidos suspensos totais do resíduo e dosagem do condicionante químico;
- Para o polímero não-iônico, somente a variável SST inicial do resíduo se mostrou determinante nos resultados da turbidez do filtrado e tempo de desaguamento;
- A concentração inicial de SST do resíduo influenciou diretamente direto no processo de desaguamento em geotêxtil, principalmente na capacidade de retenção de sólidos e no tempo de desaguamento. Valores de SST mínimos, de 0,25 g/L, não foram capazes de reter sólidos;
- O polímero catiônico foi o mais eficiente nos índices turbidez do filtrado e tempo de desaguamento. No entanto, o efluente continuou com alto teor de sólidos;
- Resíduos desaguados com SST inicial de 0,25g/L, representando os resíduos de lavagem dos filtros, não apresentaram valores de turbidez baixos.

8.2 Recomendações

Decorrente com o observado nessa pesquisa, pode-se deixar de recomendações para trabalhos futuros:

- Recomenda-se realizar o ensaio em sistema pressurizado com os mesmos valores de SST, com ampliação da faixa de dosagem de estudo dos polímeros sintéticos.

9 REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22th edition 2012., Washington, USA.

ANDRADE, C. F.; SILVA, C. M.; 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. 5. Belo Horizonte, 2014.

ANDREOLI, C.V. (coord.) **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Rio de Janeiro: Rima / ABES / PROSAB, 2001. p. 121– 142.

ANDREOLI, C. V., et al. **Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba/PR**. 22 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental. Joinville, 2003.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION-APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22th edition 2012., Washington, USA

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 10.004: Resíduos sólidos - Classificação**, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1992.

BARBOSA, R. M. **Avaliação do impacto de lodos de estações de tratamento de água à biota aquática através de estudos ecotoxicológicos**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. 292 p.

BRASIL. **Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.

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. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em: 15 dez. 2018.

BRASIL. **Lei Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm>. Acesso em: 15 dez. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução CONAMA nº. 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, nº. 92, 16 mai. 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução CONAMA nº. 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Diário Oficial da União, Brasília, DF, nº. 92, 16 mai. 2011. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 15 dez. 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria de consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html>. Acesso em: 15 dez. 2018.

CORDEIRO, J.S. **Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs**. In: REALI, M.A.P., coord. Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água. Rio de Janeiro: ABES, 1999a.

_____. **Remoção de Água de Lodos de ETAs Através de Filtração Forçada**. In: REALI, M.A.P., coord. Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água. Rio de Janeiro: ABES, 1999b.

_____. **Remoção Natural de Água de Lodos de ETAs Utilizando Leitos de Secagem e Lagoas de Lodo**. In: REALI, M.A.P., coord. Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água. Rio de Janeiro: ABES, 1999c.

CORDEIRO, J.S.; WIECHETECK, G.K. **Gestão ambiental de sistemas de tratamento de água**. In: Anais do Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 23., Cancún, 2002.

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLOUS, G. **MWH's Water Treatment**. 3ª. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, v. 1 e 2, 2008.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água – Volume I e II**, Rima Editora, São Carlos – SP, 2005.

DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D., VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. Editora LDiBe, São Carlos – SP, 2011. 454 p.

FERRANTI, E.M. **Desidratação de Lodos de Estação de Tratamento de Água**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS: Porto Alegre, 2005.

FERREIRA FILHO, S.S. **Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2017. v. 1. 472p.

FERREIRA FILHO, S. S. & SOBRINHO, P. A. **Considerações sobre o tratamento de despejos líquidos gerados em estações de tratamento de água**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, vol 3, 1998.

GUANAES, E. A. **Análise do Desaguamento do Lodo Residual de Estação de Tratamento de Água por Meio de Geossintéticos**. 129 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – CEFET, Minas Gerais, 2009.

GRZELAK, M.S., *et al.* **A Comparison of Test Methods Adopted for Assessing Geotextile Tube Dewatering Performance**. Conference Paper in Geotechnical Special Publication March 2011, 2011.

GUIMARÃES, G. C. **Estudo do adensamento e desidratação dos resíduos gerados na ETA – Brasília**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Brasília, 2007.

GUIMARÃES, M. G. A., URASHIMA D. C., VIDAL D. M. **Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems**. Geosynthetics International 5 (21), 310-320, 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2008**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2018.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. São Paulo, 2012.

KHACHAN, M. M.; BHATIA S.K. **The efficacy and use of small centrifuge for evaluating geotextile tube dewatering performance**. Geotextiles and Geomembranes (45) 280-293, 2017.

KUTAY, M. E.; AYDILEK, A. H. **Retention performance of geotextile containers confining geomaterials**. Geosynthetics International, v. 11, p. 100-113, 2004.

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

MACCAFERRI. Maccaferri AMÉRICA LATINA. **Sistema de desidratção de lodos e sedimentos**, 2015. Disponível em: <<http://www.maccaferri.com/br/download/brochure-br-sistema-de-desidracao-de-lodos-e-sedimentos-pt-aug10/?wpdmdl=7500>>. Acesso em: 07 jan 2019.

MAURER, B. W. **Flocculation and Filtration in the Geotextile Tube Environment**. Thesis, Master of Science in Civil Engineering, The Syracuse University, 2011.

MOO-YOUNG H., TUCKER W. **Evaluation of vacuum filtration testing for geotextile tubes**. Geotextiles and Geomembranes 3 (20) 191-212, 2002.

MOO-YOUNG, H. K., GAFFNEY, D. A., MO, X. **Testing Procedures to assess the viability of dewatering with geotextiles tubes**. Geotextiles and Geomembranes 5 (20) 289-303, 2002.

NICODEMO, M.L., et al. **Qualidade da água e redução da poluição**. In: Silva M.S., et al. editores técnicos. Água e Saneamento: contribuições da Embrapa. Brasília: Embrapa, 2018.

PIEPER, K.C. **Avaliação do uso de geossintético para o desague e geocontenção de resíduos sólidos de estação de tratamento de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS: Porto Alegre, 2008.

REALI, M.A.P. **Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETAs**. In: REALI, M.A.P., coord. Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. **Experimental Design and Process Optimization**, CRC Press, New York, 2014.

SABOGAL-PAZ, L. P.; DI-BERNARDO, L. **Aspectos conceituais relativos à seleção das tecnologias de tratamento e de disposição dos resíduos gerados nas estações de tratamento de água**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23., Campo Grande - MS, 2005.

SILVA, B. M. **Influência da concentração de sólidos suspensos totais no lodo a ser desaguado em geotecido**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Ribeirão Preto. Ribeirão Preto, 2017.

SILVA, L. C. **Utilização de tubos geotêxteis para confinamento, desaguamento e empilhamento de rejeito de ouro**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.

SPRINZER, J.M.; KHACHAN, M.M; BATHIA, S.K. **Influence of Synthetic and Natural Fibers on Dewatering Rate and Shear Strength of Slurries in Geotextile Tube Applications**. Int. J. of Geosynth. and Ground Eng., 2015.

TAVARES, R. G. **Atenuação de alumínio do resíduo de estações de tratamento de água por vermicompostagem e adsorção**. Tese (Doutorado em Geotecnia Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2016.

TOMINAGA, E. **Análise dos Procedimentos para Avaliação de Desempenho de Sistemas fechados com Geotêxtil para Desaguamento**. Mestrado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, 2010.

VON SPERLING, M. **Introdução a Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 4 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017.

APÊNDICE A

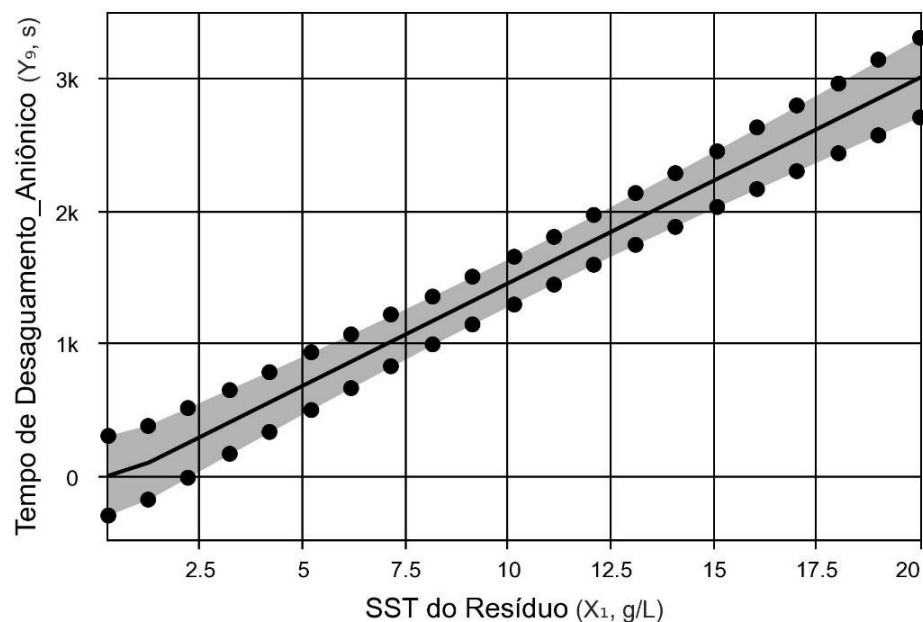
Análise de Variância, Modelos Matemáticos e Superfícies de Resposta

Tabela 21 - Análise de variância da turbidez do filtrado e tempo de desaguamento com polímero aniônico

Turbidez do filtrado (uT)					
Fonte da Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalc	p - valor
Regressão	0,0	0	Infinito	Infinito	NaN
Resíduos	91116,3	10	9111,6		
Total	91116,3	10			
Variação explicada (R²) = 0 %					
Tempo de desaguamento (s)					
Fonte da Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalc	p - valor
Regressão	13987320,2	1	13987320,2	40,00	0,00014
Resíduos	3144620,0	9	349402,2		
Total	17131940,2	10			
Variação explicada (R²) = 81,64 %. F0,10;1;9 = 3,36					
Fonte: Autor (2019)					

$$\text{Tempo de desaguamento (s)} = 1473,73 + 1526,83 x_1 \quad (5)$$

Figura 35 – Superfície de resposta do tempo de desaguamento com polímero aniônico



Fonte: Autor (2019)

Tabela 22 - Análise de variância da turbidez do filtrado e tempo de desaguamento com polímero não-iônico

Turbidez do filtrado (uT)					
Fonte da Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalc	p - valor
Regressão	130803641,7	2	65401820,9	10,00	0,0067
Resíduos	52516682,7	8	6564585,34		
Total	183320324	10			

Variação explicada (R^2) = 71,35 %. $F_{0,10;2;8} = 3,11$

Tempo de desaguamento (s)					
Fonte da Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalc	p - valor
Regressão	11854141,6	2	5927070,79	26,57	0,00029
Resíduos	1784769,3	8	223096,167		
Total	13638910,9	10			

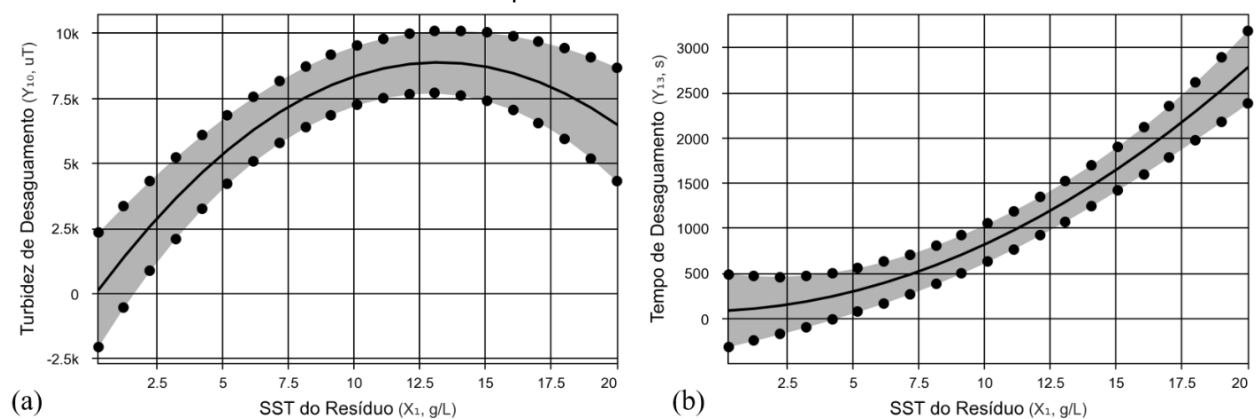
Variação explicada (R^2) = 86,91 %. $F_{0,10;2;8} = 3,11$

Fonte: Autor (2019)

$$\text{Turbidez do filtrado (uT)} = 8367 + 3179,54 x_1 - 5071,54 x_1^2 \quad (6)$$

$$\text{Tempo de desaguamento (s)} = 833 + 1347 x_1 + 595,67 x_1^2 \quad (7)$$

Figura 36 - Superfícies de resposta dos índices: turbidez do filtrado (a), tempo de desaguamento (b), com polímero não-iônico



Fonte: Autor (2019)