



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS**

**CAMPUS PALMAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LUCAS DAMACENO PEREIRA E SILVA

**FATORES DE INFLUÊNCIA NO DESAGUAMENTO DO RESÍDUO DE ETA POR
TECIDO GEOTÊXTIL**

PALMAS

2019

LUCAS DAMACENO PEREIRA E SILVA

**FATORES DE INFLUÊNCIA NO DESAGUAMENTO DO RESÍDUO DE ETA POR
TECIDO GEOTÊXTIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Civil do
Instituto Federal do Tocantins, Campus
Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Giulliano Guimarães
Silva

PALMAS

2019

Silva, Lucas Damaceno Pereira e

Fatores de influência no desaguamento do resíduo de ETA por tecido geotêxtil / Lucas Damaceno Pereira e Silva. – Palmas, 2019.

70 f.

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

Orientador: Prof. Giulliano Guimarães Silva

1. Tratamento de água. 2. Resíduo de ETA 3. Geossintéticos 4. Polímeros sintéticos. I. Título

LUCAS DAMACENO PEREIRA E SILVA

FATORES DE INFLUÊNCIA NO DESAGUAMENTO DO RESÍDUO DE ETA POR
TECIDO GEOTÊXTIL

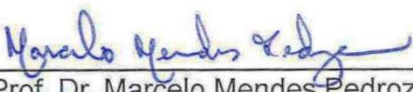
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Civil do
Instituto Federal do Tocantins, Campus
Palmas.

Aprovado em: 07/03/2019

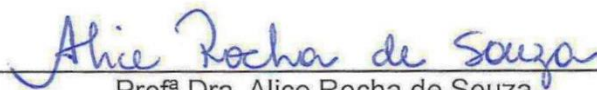
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Giuliano Guimarães Silva (Orientador)
Instituto Federal do Tocantins - IFTO



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Instituto Federal do Tocantins - IFTO



Profª Dra. Alice Rocha de Souza
Instituto Federal do Tocantins - IFTO

A Deus, pelo dom da vida e as graças alcançadas, a minha querida mãe, o amor da minha vida, e a minha família e amigos, pela força e carinho que me motivaram a seguir em frente.

AGRADECIMENTO

A minha gratidão:

A Deus, por me dar força e coragem para prosseguir em mais esta etapa da minha vida.

Ao meu orientador, Giulliano Guimarães Silva, pela confiança, orientação e parceria, que além de mestre se tornou um grande amigo, em quem tenho grande respeito.

Aos professores que ofereceram uma grande ajuda na execução deste trabalho e trouxeram grandes contribuições para o meu aprendizado: Sergio Carlos Bernardo Queiroz, Marcelo Mendes Pedroza e Alice Rocha de Souza.

Aos demais professores do IFTO que trouxeram luz para o meu caminho, por meio do conhecimento e sabedoria.

Ao Instituto Federal do Tocantins, por ter me dado todos os recursos necessários para ter uma trajetória de graduação que eu tenho muito orgulho.

A BRK Ambiental / Saneatins, que forneceu os subsídios necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos da faculdade que tornaram este caminho mais alegre e divertido, em especial a minha amiga Rayca Sabrina Caetano.

Aos meus amigos, que me deram apoio e motivação sempre que necessário.

A minha amada mãe, Maria Neusa Pereira da Silva, que é a minha inspiração de vida, em que sempre posso contar e a quem devo tudo o que sou. A minha eterna gratidão a você, mãe.

A minha família por todo amor e carinho, que sempre acreditou em mim mesmo quando eu quis desistir.

A todos que torceram e acreditarem em mim.

A gratidão desbloqueia a abundância da vida. Ela torna o que temos em suficiente, e mais. Ela torna a negação em aceitação, caos em ordem, confusão em clareza. Ela pode transformar uma refeição em um banquete, uma casa em um lar, um estranho em um amigo. A gratidão dá sentido ao nosso passado, traz paz para o hoje, e cria uma visão para o amanhã.

Melody Beattie

RESUMO

O resíduo de ETA de ciclo completo é produzido na separação do material sólido da porção líquida e apresenta um baixo teor de sólidos, geralmente abaixo de 1%. Isto implica que os resíduos devem passar por um processo de adensamento e desidratação antes da sua disposição final. Existem algumas formas de desidratar os resíduos, entre elas está o método de filtração por tecido geotêxtil. É importante que se conheça as características do resíduo, do tecido geotêxtil e o comportamento do condicionante químico a ser empregado antes do dimensionamento do sistema de desidratação do resíduo de ETA. A contribuição científica deste trabalho é levantar os parâmetros que possam influenciar na escolha do tipo de polímero e sua dosagem, além de oferecer uma avaliação do sistema de desaguamento e os fatores que podem intervir no desempenho do processo. Com isto, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito dos fatores de influência no processo de desaguamento do resíduo de ETA por meio do planejamento experimental estatístico. O estudo foi dividido em três fases: caracterização do sistema de tratamento de resíduos, coleta, preparo e caracterização dos resíduos da ETA 006 (Palmas – TO) e ensaios de bancada com tecido geotêxtil no Laboratório de Química e Saneamento do IFTO (Palmas – TO). Os resultados mostraram que a concentração de SST do resíduo e a dosagem do condicionante químico impactam na eficiência do sistema de desaguamento do resíduo de ETA por tecido geotêxtil. Os testes estatísticos demonstraram que o gradiente de velocidade e o tempo de mistura do polímero não possuem comportamento definido ao se modificar os níveis. Conclui-se que estas variáveis na verdade são constantes no processo de desaguamento, podendo ter valores fixos na operação de uma estação de tratamento de resíduos. Dentre os condicionantes químicos estudados, o polímero catiônico possuiu melhor desempenho, pois reduziu substancialmente a turbidez do filtrado (relacionada com a capacidade de retenção das partículas pelo tecido) e aumentou a vazão de desaguamento dentro de uma faixa de dosagem determinável na avaliação estatística. Sugere-se que estudos em escala piloto devem ser feitos para validação do modelo apresentado, acrescido de modelo pressurizado.

Palavras-chave: tratamento de água, resíduo de ETA, geossintéticos, polímeros sintéticos

ABSTRACT

The full-cycle WTP residue is produced by separating the solid material from the liquid portion and has a low solids content, generally below 1%. This implies that the waste must undergo a process of densification and dehydration before its final disposal. There are some ways to dehydrate the waste, among them is the method of filtration by geotextile fabric. It is important to know the characteristics of the residue, the geotextile fabric and the behavior of the chemical conditioning agent to be used before the design of the dehydration system of the WTP residue. The scientific contribution of this work is to raise the parameters that may influence the choice of the type of polymer and its dosage, besides offering an evaluation of the dewatering system and the factors that can interfere in the process performance. With this, the aim of the work was to evaluate the effect of the influence factors in the process of dewatering of the WTP residue by means of experimental design. The study was divided in three phases: characterization of the waste treatment system, collection, preparation and characterization of WTP 006 waste (Palmas - TO) and bench test with geotextile fabric in the Laboratory of Chemistry and Sanitation of IFTO (Palmas - TO). The results showed that the concentration of TSS of the residue and the dosage of the chemical conditioning effect on the efficiency of the dewatering system of WTP residue by geotextile fabric. Statistical tests have shown that the velocity gradient and the mixing time of the polymer have no defined behavior when modifying the range. It is concluded that these variables are constant in the dewatering process and may be fixed values in the operation of a waste treatment plant. Among the chemical conditions studied, the cationic polymer had better performance, as it substantially reduced the turbidity of the filtrate (related to the retention capacity of the particles by the fabric) and increased the flow rate of dewatering within a determinable dosage range in the statistical evaluation. It is suggested that pilot-scale studies should be done to validate the presented model, plus a pressurized model.

Key words: water treatment, WTP sludge, geosynthetics, synthetic polymers

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Fluxograma de uma estação de tratamento de ciclo completo	20
Figura 2.2 - <i>Bag</i> de tecido geotêxtil em operação	25
Figura 2.3 - <i>Bag</i> de tecido geotêxtil em fim de operação com resíduo desaguado ...	25
Figura 2.4 - Distribuição da umidade no interior do <i>bag</i> e formação do <i>filter cake</i>	27
Figura 3.1 - Fases da pesquisa	31
Figura 3.2 - Coleta de resíduo: descarga de resíduo no decantador (a), reservatório de 2000 l (b), análise de sólidos suspensos (c e d).....	35
Figura 3.3 - Preparo da CRE: resíduo armazenado no reservatório (a), bombonas com água filtrada (b) e concentração de SST do resíduo de estudo preparada (c)	36
Figura 3.4 - Fases do planejamento experimental dos ensaios de bancada.....	37
Figura 3.5 - Representação do DFF (2^{4-1}) utilizado no desaguamento por tecido geotêxtil em escala de bancada	38
Figura 3.6 - Representação do DFC (2^2) utilizado no desaguamento por tecido geotêxtil em escala de bancada	40
Figura 3.7 - Sistema de bancada desenvolvido para desaguamento de resíduo em geotêxtil	42
Figura 3.8 - Fluxograma dos ensaios de bancada com geotêxtil	43
Figura 3.9 - Ensaio de Cone: adição de polímero na mistura rápida (a), sistema de bancada para a filtração em geotêxtil (b) e desaguamento do resíduo (c).....	44
Figura 4.1 - Foto aérea da ETA 006 em Palmas - TO	46
Figura 4.2 - Mapa de localização da ETA 006 em Palmas - TO.	46
Figura 4.3 - Esquema geral da ETR da ETA-006 em Palmas - TO	48
Figura 4.4 - Foto aérea da ETR da ETA 006 em Palmas - TO	48
Figura 4.5 – Poço de resíduo do TCALF	49
Figura 4.6 – Entrada do resíduo do decantador no TRDD/SALF	50
Figura 4.7 - <i>Bag</i> geotêxtil instalado no sistema de tratamento dos resíduos	51

Figura 4.8 - Sistema de desaguamento de resíduos da ETA 006 em Palmas - TO...	51
Figura 4.9 - Curva granulométrica do resíduo da ETA 006.....	53
Figura 4.10 - Valores experimentais <i>versus</i> valores preditos pelo modelo para a resposta turbidez (a) e vazão (b).....	63
Figura 4.11 - Superfície de resposta (a) e curvas de contorno (b) para a resposta turbidez	64
Figura 4.12 - Superfície de resposta (a) e curvas de contorno (b) para a resposta vazão	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Equipamentos utilizados.....	32
Tabela 3.2 - Parâmetros, equipamentos, métodos e limites de medição	33
Tabela 3.3 -Produtos químicos utilizados como condicionantes químicos	33
Tabela 3.4 - Propriedades físicas do geossintético ensaiado.....	34
Tabela 3.5 - Níveis dos fatores empregados no Planejamento Experimental 2^{4-1}	38
Tabela 3.6 - Matriz do Planejamento Fatorial Fracionado 2^{4-1} (valores codificados e reais)	39
Tabela 3.7 - Níveis dos fatores empregados no Planejamento Experimental 2^2	40
Tabela 3.8 - Matriz do Delineamento de Faces Centradas 2^2 (valores codificados e reais)	41
Tabela 4.1 - Resultados da caracterização físico-química dos resíduos de estudo ..	52
Tabela 4.2 - Matriz do planejamento fatorial fracionado 2^{4-1} (valores reais e codificados) com as respostas de Turbidez (uT) e Vazão (mL/s) com o polímero catiônico	54
Tabela 4.3 - Matriz do planejamento fatorial fracionado 2^{4-1} (valores reais e codificados) com as respostas de Turbidez (uT) e Vazão (mL/s) com o polímero aniônico	55
Tabela 4.4 - Matriz do planejamento fatorial fracionado 2^{4-1} (valores reais e codificados) com as respostas de Turbidez (uT) e Vazão (mL/s) com o polímero não-iônico	56
Tabela 4.5 - Efeito dos fatores estudados no planejamento fracionado 2^{4-1} sobre a turbidez e a vazão nos ensaios com polímero catiônico	57
Tabela 4.6 - Efeito dos fatores estudados no planejamento fracionado 2^{4-1} sobre a turbidez e a vazão nos ensaios com polímero aniônico	57
Tabela 4.7 - Efeito dos fatores estudados no planejamento fracionado 2^{4-1} sobre a turbidez e a vazão nos ensaios com polímero não-iônico	58
Tabela 4.8 - Matriz do DFC com níveis codificados e reais dos fatores com as respostas de vazão e turbidez para o polímero catiônico	60
Tabela 4.9 - Matriz do DFC com níveis codificados e reais dos fatores com as respostas de vazão e turbidez para o polímero aniônico	60

Tabela 4.10 - Matriz do DFC com níveis codificados e reais dos fatores com as respostas de vazão e turbidez para o polímero não-iônico	61
Tabela 4.11 - Coeficiente de regressão e desvio padrão para os ensaios com polímero catiônico	62
Tabela 4.12 - Análise de Variância (ANOVA) para a Turbidez e a Vazão dos ensaios com polímero catiônico	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Abordagem do problema.....	17
1.2	Objetivo geral	18
1.3	Objetivos específicos	18
1.4	Justificativa	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	Tratamento de água	20
2.2	Resíduos gerados pela Estação de Tratamento de Água (ETA).....	21
2.2.1	Aspectos gerais.....	21
2.2.2	Caracterização do resíduo de ETA convencional	22
2.2.3	Impactos causados pelos resíduos	23
2.2.4	Alternativas para redução do volume de resíduo	23
2.3	Remoção natural de água de resíduos de ETAs utilizando <i>bags</i> de tecido geotêxtil.....	24
2.3.1	Aspectos gerais.....	24
2.3.2	Operação do <i>bag</i> de geotêxtil	26
2.3.3	<i>Filter cake</i>	26
2.4	Fatores de influência na desidratação do resíduo de ETA por tecido geotêxtil.....	27
2.4.1	Concentração de sólidos do resíduo	27
2.4.2	Condicionamento químico do resíduo	28
2.4.3	Gradiente de velocidade e tempo de mistura do polímero	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	Considerações iniciais	30
3.2	Equipamentos, produtos químicos e métodos analíticos	31
3.3	Caracterização do sistema de tratamento dos resíduos da ETA 006	34

3.4	Coleta, preparo e caracterização dos resíduos da ETA 006	34
3.4.1	Coleta do resíduo da ETA 006.....	34
3.4.2	Caracterização do resíduo da ETA 006.....	35
3.4.3	Preparo e caracterização do resíduo de estudo.....	35
3.5	Ensaio de bancada com tecido geotêxtil	36
3.5.1	Planejamento experimental dos ensaios de bancada	36
3.5.2	Delineamento Fatorial Fracionado (DFF) para 4 fatores (2^{4-1})	37
3.5.3	Delineamento de Faces Centradas (DFC) para 2 fatores (2^2).....	39
3.5.4	Sistema de filtração de bancada em geotêxtil	41
3.5.5	Execução dos ensaios de bancada.....	42
3.5.6	Análise dos Resultados dos ensaios de Bancada.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Caracterização do sistema de tratamento de resíduos da ETA 006.....	45
4.1.1	Estação de Tratamento de Água 006 (ETA 006)	45
4.1.2	Sistema de Tratamento de Resíduos - ETA 006.....	47
4.1.2.1	Funcionamento do Sistema de Tratamento de Resíduo – ETA 006.....	47
4.2	Caracterização dos resíduos da ETA 006.....	52
4.2.1	Resíduos utilizados no estudo	52
4.3	Ensaio de bancada com tecido geotêxtil	53
4.3.1	Planejamento experimental dos ensaios de bancada	53
4.3.1.1	Delineamento Fatorial Fracionado 2^{4-1} (DFF)	53
4.3.1.2	Delineamento de Faces Centradas 2^2 (DFC).....	59
5	CONCLUSÕES.....	65
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil existem mais de 7500 ETAs em operação, sendo em sua maioria estações de ciclo completo que produzem uma grande quantidade de resíduo gerado na etapa de decantação e lavagem dos filtros. A questão maior deste resíduo é que ele possui partículas de variada dimensão e baixa concentração de sólidos, o que dificulta a sua disposição (ACHON *et al.*, 2013).

O resíduo de ETA de ciclo completo é produzido na separação do material sólido da porção líquida e apresenta um baixo teor de sólidos, geralmente abaixo de 1%. Isto implica que os resíduos devem passar por um processo de adensamento e desidratação antes da sua disposição final (FERREIRA FILHO, 2017).

É possível a obtenção de um resíduo com concentração de sólidos de até 5% com a etapa de adensamento, no entanto, esta concentração não é ideal para a disposição final do resíduo. Neste sentido, a concepção de um sistema de desidratação do resíduo é importante para se reduzir de forma considerável a quantidade de água (FERREIRA FILHO, 2017).

Existem algumas formas de desidratar os resíduos antes da sua disposição final, entre elas está o método de filtração por tecido geotêxtil (DI BERNARDO *et al.*, 2017). Moo-Young e Tucker (2002) citam que tanto os engenheiros como os pesquisadores da área reconhecem que os materiais de alto teor de água podem ter excelente desidratação através do uso de tubos geotêxteis.

Os tubos geotêxteis são fabricados com costura de tecido geotêxtil que são capazes de encapsular e reter uma quantidade relativamente grande de material saturado. Na prática, o resíduo é bombeado para os tubos de geotêxtil a velocidades controladas, que retém a porção sólida e permite a passagem do líquido constituinte (GUIMARÃES *et al.*, 2014).

Durante a filtração, o líquido no resíduo atravessa o geotêxtil devido ao peso da porção sólida, simultaneamente com a retenção de partículas sólidas (GUIMARÃES *et al.*, 2014). Após a conclusão do processo de desidratação, o tubo é aberto e o material sólido é removido e descartado (MOO-YOUNG e TUCKER, 2002).

Existe um consenso na literatura sobre a importância do condicionamento químico do resíduo, sendo considerado o ponto chave na operação de desaguamento do resíduo por geotêxtil, que em geral, possui alta resistência à filtração. O condicionamento químico pode ser feito através do uso de polímeros catiônicos, aniônicos e não-iônicos, dependendo das características físico-químicas do resíduo (GUIMARÃES *et al.*, 2014).

Geralmente, a adição de polímeros sintéticos diminui a resistência específica à filtração através da aglomeração de partículas sólidas, permitindo a remoção de um volume maior de líquido em um período mais curto (REALI, 1999).

O condicionamento químico provoca a separação da porção sólida-líquida da pasta através da liberação da água absorvida, controlando a interação entre suspensão, velocidade e taxa de desaguamento da massa sólida (LAWSON, 2008; CASTRO *et al.*, 2009; GUANAES, 2009; SATYAMURTHY e BATHIA, 2009).

1.1 Abordagem do problema

Em uma estação de tratamento de água, os principais impactos ambientais são, de alguma forma, relacionados aos resíduos produzidos no processo de potabilização da água. Até recentemente, o resíduo da descarga do decantador e a água de lavagem dos filtros era lançado diretamente no corpo hídrico sem tratamento prévio (GUIMARÃES, 2007).

Segundo Di Bernardo *et al.* (2017), o lançamento do resíduo diretamente no corpo receptor de forma indiscriminada causa um aumento na quantidade e variedade de microrganismos patogênicos, incremento de compostos orgânicos tóxicos gerados no processo de tratamento, acréscimo na concentração de metais tóxicos, impedimento de utilização da água do corpo receptor pelas comunidades próximas a jusante para diversos fins e diminuição da luminosidade necessária para a biota através do aumento de sólidos suspensos na água.

Uma das grandes dificuldades na escolha da alternativa de projeto que possa atender a demanda do tratamento e disposição correta do resíduo de ETA é a ausência de estudos nacionais que contemplem a gestão do resíduo. Desta forma, é

notável que atualmente que poucas ETAs possuem soluções que objetivem a minimização da quantidade de despejos gerados, o tratamento e a disposição final do resíduo (FILHO e ALÉM SOBRINHO, 1998).

1.2 Objetivo geral

Avaliar o efeito dos fatores de influência no processo de desaguamento do resíduo de ETA por meio do planejamento experimental estatístico.

1.3 Objetivos específicos

- Avaliar, por meio da ferramenta estatística DOE (*Design of Experiments*), os fatores (concentração de SST do resíduo de ETA, dosagem de polímero, gradiente de velocidade e tempo de mistura do polímero) que podem exercer efeito no desempenho de desaguamento do resíduo de ETA;
- Avaliar a influência dos condicionantes químicos polímeros sintéticos catiônico, aniônico e não-iônico na eficiência do desaguamento do resíduo de ETA.

1.4 Justificativa

É importante que se conheça as características do resíduo, do tecido geotêxtil e o comportamento do condicionante químico a ser empregado ante ao dimensionamento do sistema de desidratação do resíduo de ETA. Tal conhecimento possibilita eficiência técnica, obtendo-se melhor taxa de infiltração e menor quantidade de sólidos totais do efluente, além de diminuição de custos de implantação e operação do sistema (FERREIRA FILHO, 2017).

Um parâmetro que influencia diretamente o processo de desidratação é a concentração de sólidos no resíduo. Existe uma grande redução do teor de água no resíduo de ETA e a passagem livre de finos pelos poros do tecido logo no início do desaguamento. O *filter cake* é então formado após um período de desaguamento. Enquanto o *filter cake* aumenta em espessura durante a filtração, o volume filtrado é

reduzido e a turbidez também diminui (MOO-YOUNG *et al.*, 2002; MOO-YOUNG e TUCKER, 2002; LAWSON, 2008).

Apesar da importância do conhecimento sobre a concentração de SST do resíduo, é importante que se conheça o condicionante químico mais adequado antes do processo de desaguamento por tecido geotêxtil para determinada concentração. Vários fatores influenciam o uso de condicionantes químicos no processo de coagulação, e por isso, ensaios em equipamento de jarreste são comumente feitos para se analisar o tempo de agitação na mistura rápida e o gradiente de velocidade médio (DI BERNARDO *et al.*, 2017).

O gradiente de velocidade, tempo de homogeneização da mistura e altura de queda do material despejado podem alterar a floculação das partículas pequenas e a qualidade do desaguamento (TOMINAGA, 2010).

O ensaio de cone é um método preliminar eficaz na avaliação do comportamento do material durante o desaguamento, principalmente para análise do tipo e quantidade de floculante a ser adicionado. Porém, foi observado na literatura ausência de indicações para o procedimento químico (MIRATECH, 2005; LAWSON, 2006).

A contribuição científica deste trabalho é, portanto, levantar os parâmetros que possam influenciar na escolha do tipo de polímero e sua dosagem, além de oferecer uma avaliação do sistema de desaguamento e os fatores que podem intervir no desempenho do processo. Como principais parâmetros de projeto, cita-se a concentração de SST do resíduo desejável para o desaguamento por tecido geotêxtil e a vazão de desaguamento do resíduo pelo tecido. É considerado importante que todos os fatores sejam levados em conta, para assim se avaliar a eficiência do desaguamento e avaliar a necessidade de uma etapa prévia de adensamento do resíduo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Tratamento de água

Segundo Vianna (1997), qualquer água, poluída ou não, pode ser potabilizada a depender da tecnologia escolhida. Águas com maior carga de poluentes tendem a ser mais custosas em termos financeiros e de operação.

Para ser distribuída, a água deve ser captada e então tratada em sistemas e sub-sistemas de tratamento que ocorrem em geral nas Estações de Tratamento de Água (ETAs). A água bruta é captada e bombeada para o sistema de tratamento, e antes de se iniciar o processo pode-se passar por um tratamento preliminar de remoção dos sólidos grosseiros e oxidação de metais, como ferro e manganês. A função da oxidação é tornar estes metais insolúveis na água através da adição de cloro ou produto similar na água bruta (DI BERNARDO *et al.*, 2017). A Figura 2.1 demonstra o esquema da Estação de Tratamento de Água de Ciclo Completo.

Figura 2.1 - Fluxograma de uma estação de tratamento de ciclo completo



Fonte: FERREIRA FILHO, 2017 (adaptada)

No sistema de tratamento em ciclo completo, o principal objetivo é remover a matéria em solução e em suspensão na água bruta. Utiliza-se um sal de alumínio ou ferro na coagulação da água bruta que tem por função formar predominantes de precipitados do metal do coagulante e, por fim, aprisionar impurezas da água. Em etapa posterior à coagulação e floculação, a água é encaminhada para o processo de sedimentação nos decantadores (DI BERNARDO *et al.*, 2017).

Os decantadores são tanques que facilitam a sedimentação das partículas coloidais em determinado período, e que antecedem a etapa de filtração, onde as

partículas de menor dimensão que não sedimentaram são removidas. Com a água mais clarificada, é necessário que a desinfecção seja feita para garantir a qualidade da água distribuída (FERREIRA FILHO, 2017).

Segundo Ferreira Filho (2017), a desinfecção é um processo que elimina os microrganismos através de produtos químicos (cloro, por exemplo), e que devido ao grande volume tratado, deve ser um processo econômico. Se diferencia do processo de esterilização pois tem o objetivo de eliminar microrganismos patogênicos, e não quaisquer formas de vida.

Após tratada, a água pode passar por etapa de fluoretação para prevenção da cárie na população, e se necessário, o pH pode ser corrigido para atender o padrão de potabilidade e prevenir a corrosão ou incrustações na tubulação de distribuição. A água com característica de tratada, é então aduzida para reservatórios e distribuída à população.

2.2 Resíduos gerados pela Estação de Tratamento de Água (ETA)

2.2.1 Aspectos gerais

A questão da produção de resíduos nas estações de tratamento de água tem gerado discussões e ações apenas recentemente. Enquanto que em muitos países desenvolvidos já existam técnicas e legislações aplicadas à disposição deste resíduo desde 1970, o Brasil ainda apresenta dificuldades no tratamento do resíduo de ETA, tendo apenas consolidadas legislações que ainda precisam passar por revisão para adequação da situação brasileira (FERREIRA FILHO, 2017).

Geralmente, a disposição dos resíduos de ETA é avaliada quando a ETA já está em funcionamento e em face das dificuldades encontradas, muitas concessionárias despejam o resíduo diretamente no corpo receptor.

A disposição direta do resíduo de ETA no corpo hídrico é inadequada e tem se tornado cada vez mais preocupante e proibida em muitos municípios brasileiros, embora já prevista como inadequada nas legislações brasileiras. Existe hoje, no entanto, a procura por formas adequadas de tratamento e disposição do resíduo de

ETA. Di Bernardo *et al.* (2017) afirmam que engenheiros das ETAs devem conhecer as tecnologias para tratamento e disposição correta do resíduo, utilizando tecnologias viáveis e eficientes para a realidade brasileira.

De modo geral, os resíduos produzidos em ETAs podem ser classificados em quatro grupos (ASCE *et al.*, 1996):

- Resíduos provenientes dos processos de remoção de cor e turbidez. Em geral, a maior parte deste resíduo é o resíduo proveniente do decantador e da lavagem dos filtros;
- Resíduos sólidos gerados no processo de abrandamento;
- Resíduos de sistemas de tratamento não convencionais com objetivo de remoção de compostos orgânicos da água bruta, como por exemplo, carvão ativado granular saturado;
- Resíduos líquidos gerados no processo de redução de compostos inorgânicos presentes na água bruta, como por exemplo, processos de membrana.

Segundo Ferreira Filho (2017), os tratamentos não convencionais representam uma parcela minúscula na produção de resíduo de ETA na realidade brasileira, e, portanto, estudos em volta do resíduo destes sistemas não são encontrados. As ETAs de ciclo completo, por outro lado, produzem uma quantidade de resíduo das fontes discutidas em parcela significativa.

2.2.2 Caracterização do resíduo de ETA convencional

As linhas geradoras de resíduos apresentam características distintas quanto a vazão e concentração de sólidos, razão pela qual devem ser consideradas concepções distintas de tratamento para cada uma delas (FERREIRA FILHO, 2017).

O resíduo de decantador é caracterizado como um líquido não-newtoniano, volumoso e tixotrópico, em estado de gelatinoso quando em repouso e relativamente fluido quando submetido a pressão, e que normalmente, apresenta características muito distintas em função das condições apresentadas pela água bruta, a tecnologia de tratamento, a dosagem de produtos químicos utilizados e a forma de limpeza dos decantadores (GUIMARÃES *et al.*, 2014).

A água de lavagem dos filtros é caracterizada por apresentar grande vazão e baixa concentração de sólidos. Por sua vez, os resíduos descartados pelos processos de separação sólido-líquido tendem a apresentar baixa vazão e alta concentração de sólidos (CORNWELL e ROTH, 2011).

2.2.3 Impactos causados pelos resíduos

De acordo com Di Bernardo *et al.* (2017), a maior parte das ETAs brasileiras lançam seus resíduos nos corpos de água próximos à estação, o que mostra a falta de conscientização dos responsáveis pelo tratamento da água. A gestão do tratamento deve ir além do produto, que é a água tratada, e gerir o tratamento e disposição do resíduo de forma correta. Há de se lembrar que uma estação é uma indústria e como todas as outras, consome insumos e produz resíduos.

A grande questão para o lançamento desenfreado do resíduo diretamente no corpo hídrico continua sendo os custos de implantação e manutenção do sistema de tratamento de resíduos de ETA. Ferreira Filho (2017) ressalta que a implantação de sistemas de tratamento de fase sólida em ETAs ainda que possibilite a solução de um problema ambiental relevante, induz a aumento dos custos operacionais no tratamento de água.

2.2.4 Alternativas para redução do volume de resíduo

O resíduo de ETA de ciclo completo é produzido na separação do material sólido da porção líquida, e apresenta um baixo teor de sólidos, geralmente abaixo de 1% (FERREIRA FILHO, 2017). Isto implica que os resíduos devem passar por um processo de desidratação e adensamento antes da sua disposição final. As alternativas mais comuns para o adensamento do resíduo são os adensadores por gravidade, adensadores mecanizados ou flotação por ar dissolvido.

De acordo com Ferreira Filho (2017), o resíduo adensado apresenta teor sólidos do resíduo bruto entre 2% e 5%, em geral. Apesar de bastante reduzido, este resíduo não apresenta as características de desidratação necessárias para a sua

disposição final classificada como resíduo sólido. Com isto, é necessário a implantação de um sistema de desidratação que eleve o teor de sólidos do resíduo.

Di Bernardo *et al.* (2017) cita algumas formas de desidratar os resíduos, entre elas os sistemas mecanizados (prensas desaguadoras, centrífugas, filtro prensa de esteira, etc) e os métodos naturais (lagoa de resíduo, etc) e por filtração (leito de secagem e de drenagem, tecido geotêxtil, etc). Cada uma destas técnicas possui suas características e aplicações, e, portanto, devem ser levadas em conta no dimensionamento, como os custos, a operação e a manutenção destes sistemas. Em qualquer destes sistemas é desejável uma concentração de Sólidos Suspensos Totais acima de 200 g/L no resíduo.

2.3 Remoção natural de água de resíduos de ETAs utilizando *bags* de tecido geotêxtil

2.3.1 Aspectos gerais

Nos últimos anos, uma técnica de desidratação bastante popularizada é o sistema fechado de geotêxtil, que permite encapsulamento, isolamento, e desidratação do resíduo, permitindo o controle das variáveis de entrada e saída do sistema (GUIMARÃES *et al.*, 2014).

Moo-Young e Tucker (2002) citam que tanto os engenheiros como os pesquisadores da área reconhecem que os materiais de alto teor de água podem ter excelente desidratação através do uso de tubos geotêxteis. Os tubos geotêxteis são fabricados com costura de tecido geotêxtil que são capazes de encapsular e reter uma quantidade relativamente grande de material saturado.

O método consiste em bombear resíduo em tubos geotêxtil a velocidades controladas para reter a porção sólida e permitir a passagem do líquido constituinte, conhecida como efluente (ou filtrado). Durante a filtração, o líquido no resíduo se filtra através do geotêxtil devido ao gradiente a ao peso da porção sólida, simultaneamente com a retenção de partículas sólidas (GUIMARÃES *et al.*, 2014).

As aberturas de entrada na parte superior permitem a fixação de um tubo que transporta o resíduo para dentro dos tubos. Essas aberturas são geralmente espaçadas em qualquer lugar entre 10 e 150 m de distância, dependendo da natureza do preenchimento. Após a conclusão do processo de desidratação, o tubo é aberto e o material sólido é removido e descartado (MOO-YOUNG e TUCKER, 2002). A Figura 2.2 e a Figura 2.3 retratam o *bag* em operação e em fim de operação.

Figura 2.2 - *Bag* de tecido geotêxtil em operação



Fonte: Husker (2018)

Figura 2.3 - *Bag* de tecido geotêxtil em fim de operação com resíduo desaguado



Fonte: Huesker (2018)

2.3.2 Operação do *bag* de geotêxtil

Segundo Guimarães *et al.* (2014), a operação do *bag* de geotêxtil envolve o bombeamento do resíduo bruto para elementos compostos por membranas filtrantes fechadas, sendo que os sólidos são retidos no interior dos *bags*, e o filtrado drenado ao longo de sua área superficial externa.

A pressão de bombeamento do resíduo aos *bags* deve ser do tipo deslocamento positivo, variando entre 1,5 e 2,5 bar, sendo que a vazão de alimentação deve ser constante ao longo do tempo. Para que o processo de desidratação do resíduo ocorra de forma eficaz, é necessário o condicionamento do resíduo com polímero adequado, podendo ser efetuada diretamente na linha de alimentação do resíduo bruto. A escolha do polímero deve ser feita baseada em testes de bancada e suas faixas de operação dependem do polímero adotado, variando entre 2 a 8 g/kg.ST (FERREIRA FILHO, 2017).

A operação do *bag* de geotêxtil com característica de membrana filtrante possui as etapas de bombeamento para o tubo geotêxtil, retenção do resíduo pelo tecido e subsequente drenagem do filtrado e retorno ao início do processo de tratamento como água reaproveitada. O resíduo é bombeado para dentro do tubo até que se atinja uma altura máxima de recomendação do fabricante, baseada no volume do *bag*, e então o bombeamento é desligado. Parte-se então para a consolidação e drenagem final (DI BERNARDO *et al.*, 2017).

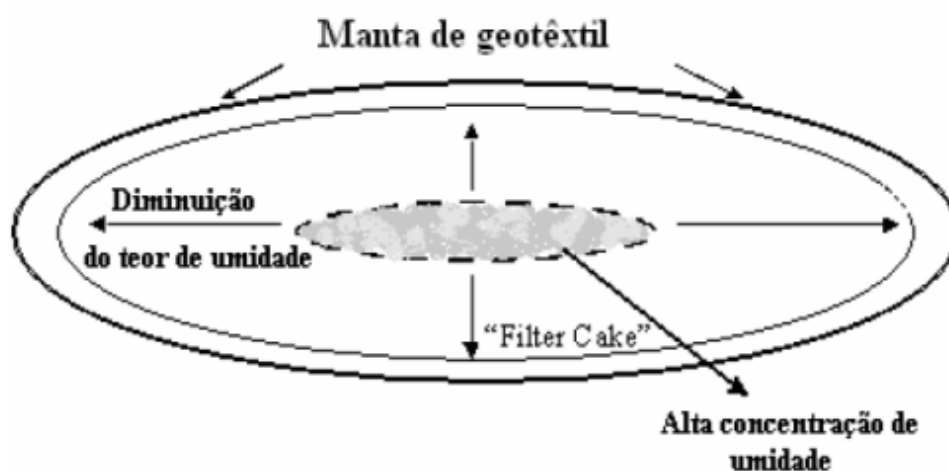
Com o fim da vida útil do *bag*, ou seja, com volume total preenchido, o tecido é aberto e o resíduo é removido, sendo destinado a um pátio de resíduo ou aterro sanitário (GUIMARÃES *et al.*, 2014).

2.3.3 *Filter cake*

O *filter cake* é definido como um acúmulo de resíduo de granulometria variada formada na interface interna do tubo geotêxtil, caracterizada como um processo de colmatação física ou biológica com material que eleva o potencial de filtração, porém diminui a permeabilidade do material pelo geotêxtil (GUANAES, 2009).

A quantidade de sólidos em suspensão no filtrado é alta no início do processo de desaguamento, mas diminui com a formação do filtro. Todos os fenômenos que dificultam a saída do fluido retêm um teor de umidade mais elevado dentro dos *bags* (MOO-YOUNG *et al.*, 2002). A Figura 2.4 mostra a distribuição de umidade no *filter cake*.

Figura 2.4 - Distribuição da umidade no interior do *bag* e formação do *filter cake*



Fonte: GAFFNEY *et al.* (1999)

2.4 Fatores de influência na desidratação do resíduo de ETA por tecido geotêxtil

2.4.1 Concentração de sólidos do resíduo

Entende-se por sólidos totais (ST) o material residual proveniente da evaporação da porção líquida através da desidratação a uma certa temperatura. Este material sólido pode ainda ser classificado como sólido suspenso total (SST) e sólido dissolvido total (SDT) (DI BERNARDO *et al.*, 2017).

Segundo Ferreira Filho (2017), problemas operacionais, técnicos e econômicos podem ser causados pela ausência de procedimento adequado no processo de desidratação do resíduo. A maior consequência da irregularidade do teor

de sólidos do resíduo ao longo do tempo é a dosagem inadequada de polímeros, sendo estes importantes para as etapas de coagulação e desidratação do resíduo.

2.4.2 Condicionamento químico do resíduo

A importância de realizar ensaios para previsão de comportamento de filtração e desaguamento de resíduos em sistemas fechados de geotêxtil é indiscutível. Um aspecto de grande influência no comportamento final é o condicionamento químico, realizado por meio da introdução de aditivos. Conforme salientam Satyamurthy e Bhatia (2009), os condicionantes químicos coagulantes aumentam o potencial de filtração, resultando em um alto índice de vazão e qualidade do efluente dos materiais com sólidos finos que possuam resistência à filtração.

Segundo Guimarães (2007), os polímeros podem ser classificados como sintéticos ou naturais, e segundo a carga elétrica podem ser ainda não-iônicos, aniônicos e catiônicos. Outros critérios importantes são a densidade da carga elétrica e o peso molecular. Portanto, a escolha de apenas um dos tipos de polímero é suficiente, determinada pela sua eficiência no processo de desidratação.

A eficiência do condicionamento químico, entre outros fatores, está relacionada ao tipo de polímero, sua concentração e dosagem. Geralmente, a adição de polímeros sintéticos diminui a resistência específica à filtração através da aglomeração de partículas sólidas, permitindo a remoção de um volume maior de líquido em um período mais curto (GUIMARÃES *et al.*, 2014).

O critério de seleção do polímero coagulante baseado no tipo de água bruta e as características do tratamento. São critérios de escolha do polímero o custo, transporte, disponibilidade do produto e estabilidade química (AWWA, 1990). Em geral, são feitos testes de bancada para a escolha e ajuste do polímero.

2.4.3 Gradiente de velocidade e tempo de mistura do polímero

O processo de coagulação é enfocado como um conjunto de reações químicas envolvendo o coagulante, o meio aquoso e as partículas coloidais, facilitando

a desestabilização química do sistema coloidal para as próximas etapas de tratamento. Entretanto, deve-se considerar as condições de mistura do coagulante, bem como a velocidade de formação do floco (FERREIRA FILHO, 2017).

Os trabalhos pioneiros efetuados por Camp e Stein (1943) viabilizaram a proposição do gradiente de velocidade como um parâmetro que ofereceria meios de avaliar as condições ótimas de mistura do coagulante na fase líquida.

Quanto maior a diferença de velocidade em relação à distância, maior será, portanto, o gradiente de velocidade, e dessa maneira maior será a intensidade de turbulência no escoamento, o que, em tese, possibilitará uma condição melhor de mistura na fase líquida (FERREIRA FILHO, 2017). Ressalta-se que o gradiente de velocidade apresenta unidade de medida " s^{-1} ", derivada da razão entre a variação de velocidade e a variação de distância.

Existem discussões sobre as limitações do conceito do gradiente de velocidade como um parâmetro que possa definir as condições de mistura no processo de coagulação e floculação e, resumidamente, pode-se constatar que (HAN e LAWLER, 1992):

- Parte da energia introduzida no escoamento por meio de equipamentos mecanizados pode ser perdida na forma de calor, não estando disponível para os processos de mistura;
- O conceito de gradiente de velocidade como parâmetro de mistura e agregação é importante para partículas com dimensões superiores a um micrômetro, não sendo relevante para dimensões inferiores.

O parâmetro gradiente de velocidade tem sido empregado há mais cinquenta anos em vários projetos bem-sucedidos e como não existem parâmetros mais confiáveis, os sistemas de coagulação e floculação na mistura rápida serão dimensionados utilizando esta variável por muito tempo. Existem hoje valores usuais de projeto que podem ser aplicados em projeto, baseados em histórico de instalações bem projetadas (FERREIRA FILHO, 2017):

- Tempo de detenção hidráulica entre 10 e 30 s
- Gradiente de velocidade entre 300 e 1000 s^{-1}
- Rotação entre 40 e 125 rpm

As unidades de mistura rápida são de simples dimensionamento e sua finalidade é garantir ótimas condições de dispersão do coagulante no meio aquoso. Geralmente consistem na implantação de sistemas de agitação em câmaras dispostas em um canal ou estrutura específica, sendo uma ou mais unidades em série (FERREIRA FILHO, 2017).

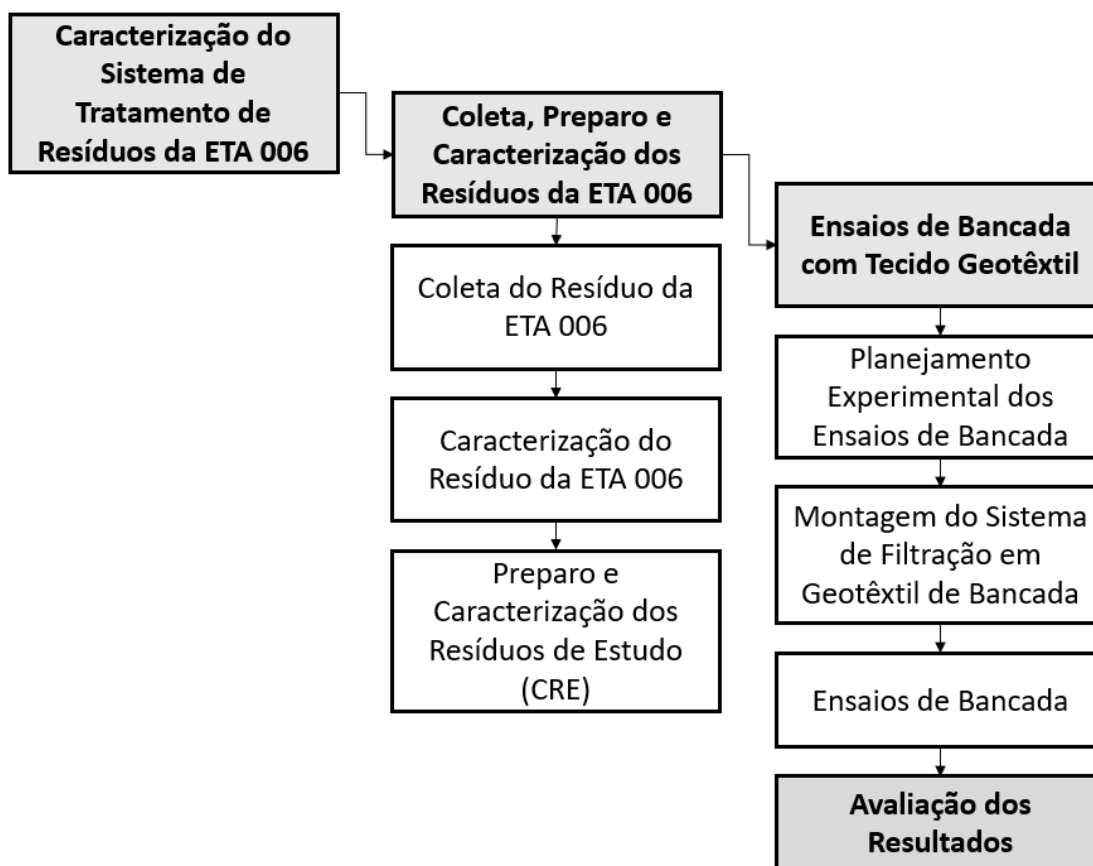
Em seus trabalhos, Tominaga (2010) observou que existe uma ausência de indicações para o procedimento de condicionamento químico. O gradiente de velocidade e de tempo de homogeneização da mistura podem alterar a floculação das partículas pequenas do resíduo. Estes fatores podem, portanto, variar a velocidade e qualidade do desaguamento.

3 METODOLOGIA

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será descrita a execução do planejamento experimental. O estudo foi dividido em três fases. A Figura 3.1 apresenta as fases da pesquisa. A primeira fase da pesquisa teve por objetivo a caracterização do sistema de tratamento de resíduos, e na segunda fase foi feita a coleta, preparo e caracterização dos resíduos coletados na ETA 006 (Palmas – TO), de responsabilidade operacional da BRK Ambiental / Saneatins. Na terceira fase foram feitos os ensaios de bancada com tecido geotêxtil no Laboratório de Química e Saneamento do IFTO (Palmas – TO), para definição das melhores condições de dosagens dos condicionantes químicos no desaguamento em geotêxtil.

Figura 3.1 - Fases da pesquisa



Fonte: Autor (2019)

3.2 Equipamentos, produtos químicos e métodos analíticos

São apresentadas na Tabela 3.1 as especificações e a função dos equipamentos usados neste trabalho. A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros físico-químicos, unidades e limites de medição.

Tabela 3.1 - Equipamentos utilizados

Equipamentos	Função
Jarteste, Nova Ética - modelo LDB 6	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 Leitura de cor verdadeira
Espectrofotômetro de absorção atômica, modelo AA – Analyst 700 - marca Perkin Elmer	Análises de metais
Espectrofotômetro Cary 1E UV - marca Varian	Leitura de absorbância a 254 nm
pHmetro (potenciômetro), modelo 230 - marca Orion	Leitura de pH
Turbidímetro nefelométrico, modelo 2100 P – marca Hach	Leitura de turbidez
Conjunto moto-bomba com 2 CV de potência, monobloco da marca NETZSCH Modelo NM031 1.710 RPM, 60 Hz, com vazão de 80 m³/h com inversor de frequência	Bombeamento de resíduo
Reservatórios de 2000 L, 1000 L e 500 L	Armazenamento de resíduo
Disco e bolsa geotêxtil	Filtração
Master Sizer 2000 Marca Malvern	Distribuição de tamanho das partículas do resíduo

Fonte: Autor (2019)

Tabela 3.2 - Parâmetros, equipamentos, métodos e limites de medição

Parâmetro	Unidade	Método	Limite de Detecção
Alumínio	mg/L AL	EAA – forno de grafite	0,001
Alcalinidade	mg/L CaCO_3	Titrimétrico	0,1
Carbono Orgânico Total	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não-dispersivo – NPOC	0,1
Carbono Orgânico Dissolvido	mg/L C	Espalhamento de luz laser de baixo ângulo	0,02
Ferro	mg/L Fe	EAA – Chama	0,01
Manganês	mg/L	EAA – Chama	0,001
pH	adimensional	Potenciométrico	10 μm
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	Gravimétrico	0,01
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 (2019)

Na Tabela 3.3 apresenta os produtos químicos utilizados como condicionantes químicos neste trabalho, com nome comercial, estado físico, peso molecular, densidade da massa e o tamanho das partículas.

Tabela 3.3 -Produtos químicos utilizados como condicionantes químicos

Produto Químico	Nome Comercial	Estado físico	Peso molecular	Densidade da massa	Tamanho das Partículas
Polímero Sintético Catiônico	Flonex 4350 SH	Sólido granulado	Alto	-	-
Polímero Sintético Aniônico	Flonex 923 SH	Sólido granulado	Alto	0,79	> 10 mm: 2% <100 mm: 6%
Polímero Sintético Não Aniônico	Flonex 920 SHR	Sólido granulado	Muito alto	0,74	> 2 mm: 2% <0.15 mm: 6%

Fonte: SNF do Brasil (2018)

Na Tabela 3.4 apresenta o geotêxtil utilizado para o desaguamento do resíduo e as propriedades físicas do tecido.

Tabela 3.4 - Propriedades físicas do geossintético ensaiado.

Propriedades	PP 105/105 DW
Matéria-prima	Polipropileno
Massa por unidade de área (EN ISO 9864)	445 g/m ²
Resistência a tração nominal (EN ISO 10.319)	≥ 105 kN/m
Deformação na Resistência Nominal (EN ISO 10.319)	≤ 9%
Permeabilidade (EN ISO 11.058)	25x10 ⁻³ m/s
Tamanho da abertura (NBR 12.956)	200 µm

Fonte: Huesker (2018)

3.3 Caracterização do sistema de tratamento dos resíduos da ETA 006

Para caracterizar o sistema de tratamento de resíduos da ETA 006, foram feitas visitas técnicas na estação no período de coleta do resíduo no mês de abril de 2018. As características dos resíduos utilizados para os ensaios em bancada se referem ao resíduo coletado na descarga do decantador no período de 10 a 13 de abril de 2018.

Na oportunidade, foi feita uma análise e compilação dos principais parâmetros hidráulicos da Estação de Tratamento de Resíduos da ETA 006, conforme relatórios e projetos disponibilizados pela BRK Ambiental / Saneatins (2018).

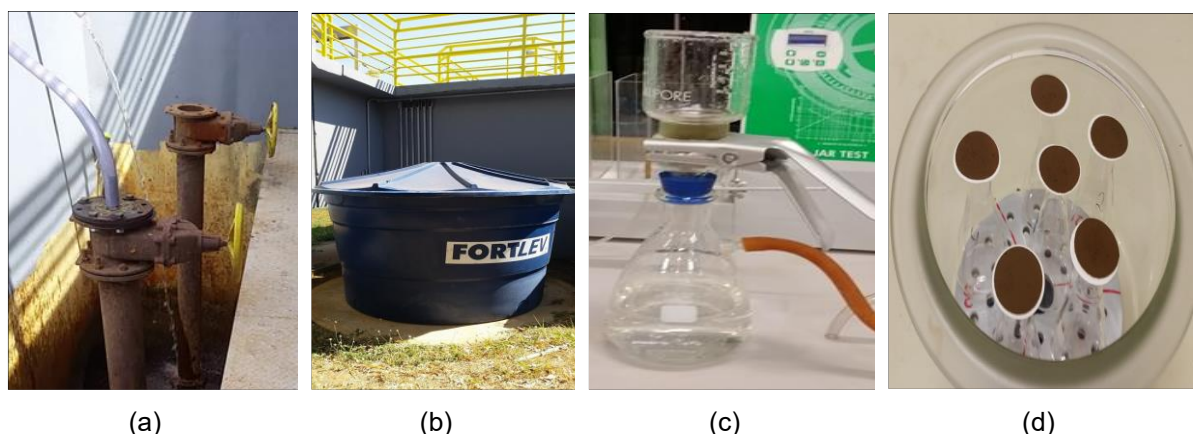
3.4 Coleta, preparo e caracterização dos resíduos da ETA 006

3.4.1 Coleta do resíduo da ETA 006

A coleta do resíduo da ETA 006 foi realizada no período de 10 a 13 de abril de 2018, na descarga do decantador da estação. Um dos objetivos desta coleta em batelada foi obter uma quantidade de massa (teor de sólidos acima de 100 g/L) e volume de resíduo denominado “resíduo mãe”, necessário para execução de todos os ensaios do planejamento experimental.

A coleta do resíduo do decantador da ETA 006 foi realizada na seguinte sequência: coletar na descarga do decantador um volume de resíduo de 2000 L, reservado em caixa d'água; deixar a amostra proveniente do decantador em repouso por 24 h; sifonar o líquido sobrenadante após este período e repetir o procedimento até reservar 2000 L de resíduo com concentração de 100 g/L.

Figura 3.2 - Coleta de resíduo: descarga de resíduo no decantador (a), reservatório de 2000 l (b), análise de sólidos suspensos (c e d)



Fonte: Autor (2019)

3.4.2 Caracterização do resíduo da ETA 006

Os resíduos da ETA 006 foram submetidos à caracterização físico-química. As análises foram feitas no Laboratório de Química e Saneamento do IFTO (Palmas – TO) e do Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP (Ribeirão Preto – SP). As metodologias adotadas nas análises são descritas em APHA (2012). A análise da distribuição das partículas do resíduo da ETA 006 foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da USP em São Paulo – SP, de acordo com a NBR 7181 (1984).

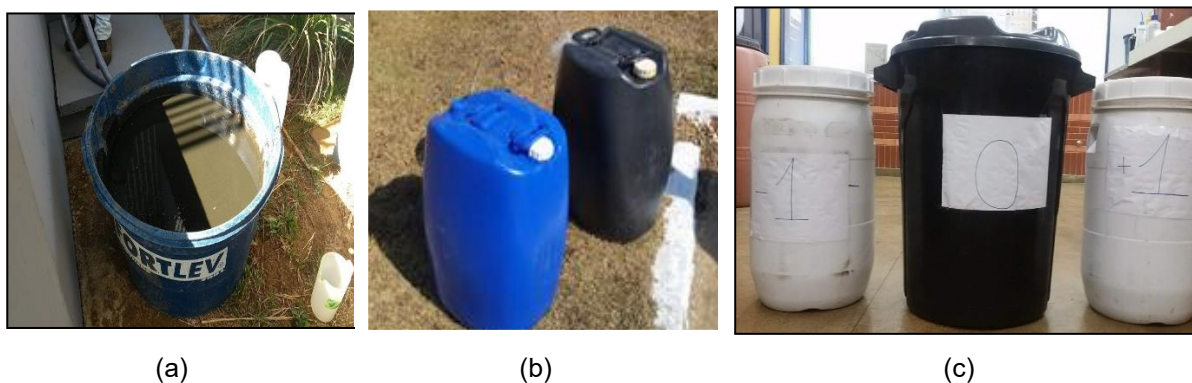
3.4.3 Preparo e caracterização do resíduo de estudo

Para os ensaios do sistema de filtração de bancada por geotêxtil, foi utilizado o resíduo armazenado em reservatório de 2000 L com teor de sólidos acima

de 100 g/L. Nesta fase, um volume de 500 L do resíduo foi levado ao Laboratório de Química e Saneamento (IFTO, Palmas, Tocantins – Brasil). Posteriormente, realizou-se a caracterização físico-química do resíduo.

A partir do “resíduo mãe” foram preparadas três Concentrações de Resíduo de Estudo (CRE). Desta forma, para se obter as três concentrações de SST do resíduo de estudo para os ensaios de filtração de bancada, foi utilizada água filtrada da ETA 006 para preparação das concentrações do planejamento experimental, sendo: CRE de 0.25 g/L, CRE de 10.13 g/L e CRE de 20 g/L. A Figura 3.3 ilustra o processo descrito até a armazenagem das concentrações diferentes para os ensaios de bancada.

Figura 3.3 - Preparo da CRE: resíduo armazenado no reservatório (a), bombonas com água filtrada (b) e concentração de SST do resíduo de estudo preparada (c)



Fonte: Autor (2019)

3.5 Ensaios de bancada com tecido geotêxtil

3.5.1 Planejamento experimental dos ensaios de bancada

A necessidade neste trabalho de otimização e maximização do rendimento dos experimentos, obtendo assim produtividade e qualidade, foi suprida através do Planejamento Experimental (DOE).

Utilizou-se a metodologia do planejamento experimental para se conhecer o comportamento dos fatores estudados. Este método, quando associado à análise de superfícies de resposta, baseia-se na teoria estatística para a compreensão dos resultados a serem obtidos (Rodrigues e lemma, 2014).

Dois planejamentos experimentais foram feitos neste trabalho. O primeiro, o Delineamento Fatorial Fracionado (DFF) foi executado para se conhecer o efeito dos fatores que poderiam exercer impacto no processo de desaguamento do resíduo por tecido geotêxtil. E o segundo, o Delineamento de Faces Centradas (DFC) foi realizado para a geração de modelos dos fatores que comprovadamente tiveram influência no desaguamento do resíduo por tecido geotêxtil. A Figura 3.4 apresenta a sequência de execução dos planejamentos experimentais dos ensaios de bancada.

Figura 3.4 - Fases do planejamento experimental dos ensaios de bancada



Fonte: Autor (2019)

3.5.2 Delineamento Fatorial Fracionado (DFF) para 4 fatores (2^{4-1})

Existe na literatura recomendações da necessidade de investigação dos possíveis efeitos de alguns fatores no desempenho do desaguamento do resíduo de ETA por tecido geotêxtil, que poderiam alterar a floculação das partículas e a qualidade do desaguamento. Tais fatores são a concentração de SST do resíduo, a dosagem do condicionante químico utilizado, e a velocidade e tempo de mistura deste condicionante (DI BERNARDO *et al.*, 2017; TOMINAGA, 2010).

Foi verificado por meio do Delineamento Fatorial Fracionado (DFF), o efeito de quatro fatores no desaguamento por tecido geotêxtil em escala de bancada, sendo

estes: Concentração de SST do Resíduo (g/L), Dosagem de Polímero (mgPol./gSST), Gradiente de Velocidade (s^{-1}) e Tempo de Mistura do Polímero (s). As respostas avaliadas foram a Turbidez do Efluente Filtrado (uT) e a Vazão de Desaguamento (L/s), relacionadas à capacidade de retenção das partículas finas e a vazão de infiltração pelo tecido geotêxtil.

Aplicou-se um planejamento experimental fracionado 2^{4-1} , com 11 experimentos (8 ensaios mais 3 experimentos no ponto central), que foram realizados de forma aleatória. A representação do processo do DFF é mostrado na Figura 3.5 e os níveis codificados e reais adotados são apresentados na Tabela 3.5.

Figura 3.5 - Representação do DFF (2^{4-1}) utilizado no desaguamento por tecido geotêxtil em escala de bancada



Nota: Fator 1: Concentração de SST do Resíduo (g/L); Fator 2: Dosagem de Polímero (mgPol./gSST); Fator 3: Gradiente de Velocidade (s^{-1}) e Fator 4: Tempo de mistura do Polímero (s). Fonte: Autor (2019)

Tabela 3.5 - Níveis dos fatores empregados no Planejamento Experimental 2^{4-1}

Nome da Variável	Código	Nível		
		-1	0	1
Concentração de SST do Resíduo (g/L)	x ₁	0,25	10,13	20,00
Dosagem de Polímero (mgPol./gSST)	x ₂	0,50	1,50	2,50
Gradiente de Velocidade (s^{-1})	x ₃	50	200	350
Tempo de Mistura do Polímero (s)	x ₄	15	60	105

Fonte: Autor (2019)

O planejamento adotado derivou-se na matriz de experimentos apresentada na Tabela 3.6. Há valores codificados e reais para os níveis adotados e cada experimento possui uma combinação diferente de níveis em relação aos fatores.

Tabela 3.6 - Matriz do Planejamento Fatorial Fracionado 2^{4-1} (valores codificados e reais)

Ensaio	Fatores			
	Concentração de SST do Resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol./gSST)	Gradiente de Velocidade (s^{-1})	Tempo de mistura do Polímero (s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,5)	-1 (50)	-1 (15)
2	1 (20)	-1 (0,5)	-1 (50)	1 (105)
3	-1 (0,25)	1 (2,5)	-1 (50)	1 (105)
4	1 (20)	1 (2,5)	-1 (50)	-1 (15)
5	-1 (0,25)	-1 (0,5)	1 (350)	1 (105)
6	1 (20)	-1 (0,5)	1 (350)	-1 (15)
7	-1 (0,25)	1 (2,5)	1 (350)	-1 (15)
8	1 (20)	1 (2,5)	1 (350)	1 (105)
9	0 (10,13)	0 (1,5)	0 (200)	0 (60)
10	0 (10,13)	0 (1,5)	0 (200)	0 (60)
11	0 (10,13)	0 (1,5)	0 (200)	0 (60)

Fonte: Autor (2019)

3.5.3 Delineamento de Faces Centradas (DFC) para 2 fatores (2^2)

Em sequência aos ensaios do Delineamento Fatorial Fracionado (DFF), descrito no item 3.5.2, foi feito o Delineamento de Faces Centradas 2^2 (DFC), que teve como objetivo a avaliação da influência dos fatores que comprovadamente tiveram influência no desaguamento do resíduo por tecido geotêxtil em escala de bancada, sendo eles a Concentração de SST do Resíduo (g/L) e a Dosagem de Polímero (mgPol./gSST). A Figura 3.6 apresenta uma representação do planejamento experimental.

Buscou-se neste planejamento avaliar a eficiência dos polímeros (catiônico, aniônico e não-iônico) através dos resultados dos ensaios e avaliar a

condição otimizada dentro da faixa de estudo adotada para o polímero de melhor desempenho. Os níveis codificados e reais adotados são apresentados na Tabela 3.7.

Figura 3.6 - Representação do DFC (2^2) utilizado no desaguamento por tecido geotêxtil em escala de bancada



Nota: Fator 1: Concentração de SST do Resíduo (g/L) e Fator 2: Dosagem de Polímero (mgPol./gSST) (mgPol./gSST).Fonte: Autor (2019)

Tabela 3.7 - Níveis dos fatores empregados no Planejamento Experimental 2^2

Nome da Variável	Código	Nível		
		-1	0	1
Concentração de SST do resíduo (g/L)	x_1	0,25	10,13	20,00
Dosagem de polímero (mgPol./gSST)	x_2	0,50	1,50	2,50

Fonte: Autor (2019)

Para o fator Concentração de SST do Resíduo (x_1), o nível máximo (+1) de 20 g/L foi determinado por ser uma concentração característica do resíduo de descarga de decantadores de ETAs, e o nível mínimo (-1) como valor típico de água de descarte da lavagem de filtros de ETAs. Os níveis da Dosagem de Polímero (x_2) foram definidos baseado na bibliografia e ensaios prévios em teste de bancada (DI BERNARDO *et al.*, 2017). Foram feitos 11 experimentos, sendo 3 no ponto central para garantir a repetibilidade confiável dos ensaios, conforme Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Matriz do Delineamento de Faces Centradas 2² (valores codificados e reais)

Ensaio	Fatores	
	Concentração de SST do Resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol./gSST)
1	-1 (0,25)	-1 (0,50)
2	1 (20)	-1 (0,50)
3	-1 (0,25)	1 (2,50)
4	1 (20)	1 (2,50)
5	-1 (0,25)	0 (1,5)
6	1 (20)	0 (1,5)
7	0 (10,13)	-1 (0,50)
8	0 (10,13)	1 (2,50)
9	0 (10,13)	0 (1,5)
10	0 (10,13)	0 (1,5)
11	0 (10,13)	0 (1,5)

Fonte: Autor (2019)

3.5.4 Sistema de filtração de bancada em geotêxtil

O sistema de filtração por tecido geotêxtil em escala de bancada utilizado nos ensaios foi construído para permitir o desaguamento do resíduo de forma rápida e simples, de forma que se possa utilizar a metodologia dos ensaios com mais facilidade, como mostrado na Figura 3.7.

O sistema consiste em uma redução de PVC (75 x 50 mm) fixada a um suporte de madeira. O tecido geotêxtil em formato de disco foi preso ao lado de menor diâmetro da redução com auxílio de uma abraçadeira metálica. O líquido permeado foi coletado por um funil de plástico e reservado em béqueres de vidro, para análises posteriores.

Figura 3.7 - Sistema de bancada desenvolvido para desaguamento de resíduo em geotêxtil

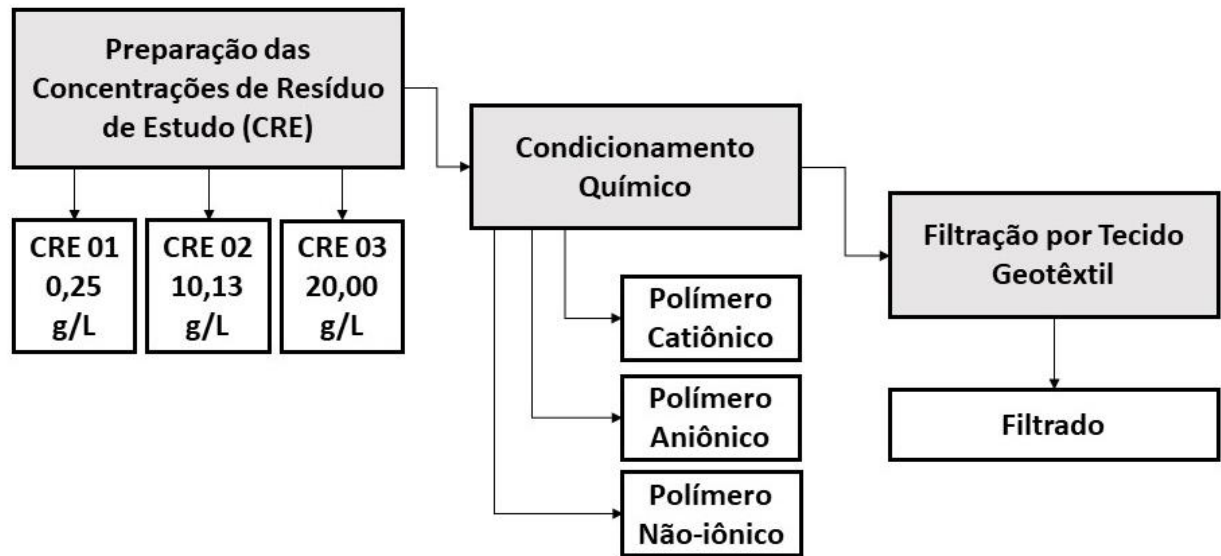


Fonte: Autor (2019)

3.5.5 Execução dos ensaios de bancada

O ensaio de bancada em geotêxtil seguiu a metodologia descrita por Miratech (2005) e Lawson (2006) denominada ensaio de teste de cone em geotêxtil. Este ensaio é um modo simples e rápido de se determinar a porcentagem de material retido no geotêxtil em estudo e a qualidade do filtrado obtido, possibilitando a estimativa da melhor dosagem do condicionante para o resíduo em estudo. A Figura 3.8 apresenta o fluxograma da rotina de ensaios de bancada com tecido geotêxtil.

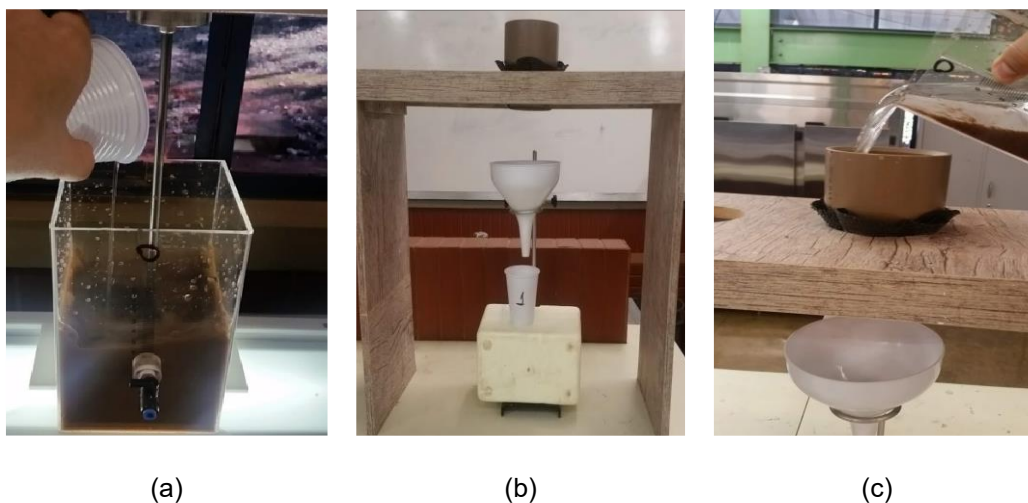
Figura 3.8 - Fluxograma dos ensaios de bancada com geotêxtil



Fonte: Autor (2019)

O ensaio de cone foi organizado seguindo os seguintes passos: homogeneização da amostra bruta e preenchimento dos jarros com 0,5 L das três amostras brutas (CRE 01, CRE 02 e CRE 03), conforme a definição do planejamento experimental; para cada amostra de CRE, foram realizados ensaios em jarteste variando-se as dosagens dos condicionantes químicos (polímeros sintéticos aniônico, catiônico e não iônico) de 0,5; 1,5 e 2,5 mg/g SST, com gradiente de mistura de 200 s⁻¹ por 60 segundos; após a mistura rápida no jarteste, as amostras foram filtradas em geotêxtil, com a sequência representada na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Ensaio de Cone: adição de polímero na mistura rápida (a), sistema de bancada para a filtração em geotêxtil (b) e desaguamento do resíduo (c)



Fonte: Autor (2019)

Durante a filtração em geotêxtil, foi registrado o volume do filtrado em função do tempo. A cada 10 s realizava-se uma coleta com objetivo de analisar o tempo de desaguamento. Para o encerramento do desaguamento contínuo nos ensaios de cone, seguiu-se a proposta de Tominaga (2010) de 20 gotas por minuto.

Após a etapa de filtração, foi realizada a caracterização do filtrado, analisando-se o volume filtrado e os valores de turbidez da amostra.

No encerramento de cada ensaio, o resíduo retido no filtro geotêxtil foi coletado e a análise de sólidos foi realizada conforme recomendação do Standard Methods (APHA, 1998).

3.5.6 Análise dos Resultados dos ensaios de Bancada

O tratamento estatístico dos dados gerados nos ensaios de bancada, a forma de avaliação e a validação dos resultados teve o seguinte roteiro:

- 1) Todos os dados gerados nos delineamentos experimentais passaram pelo tratamento estatístico no software *Protimiza Experimental Design* (<http://experimental-design.protimiza.com.br>), sendo obtido o grau de significância de cada variável pesquisada (p-valor);

- 2) O software elaborou o modelo para os resultados que apresentaram significância estatística para alguma variável, detalhando as mudanças dos níveis dos fatores sobre as respostas (índice de desempenho);
- 3) Cada modelo matemático foi submetido à análise de variância (ANOVA), onde foi verificada a compatibilidade entre valores previstos e experimentais;
- 4) Com o modelo validado pela ANOVA, as superfícies de respostas foram geradas para cada índice de desempenho.

Todas as informações e gráficos foram extraídos do software, e todos os cálculos realizados foram validados pelos pesquisadores. Os Resultados e Discussões são apresentados no item 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de desaguamento do resíduo da ETA 006 de Palmas – TO. No item 4.1 é feita a descrição do sistema de tratamento de resíduos da ETA 006, no item 4.2 serão apresentados os resultados da caracterização dos resíduos, e finalmente, no item 4.3 serão apresentados e discutidos os ensaios de bancada em geotêxtil.

4.1 Caracterização do sistema de tratamento de resíduos da ETA 006

4.1.1 Estação de Tratamento de Água 006 (ETA 006)

A ETA 006 é classificada como Ciclo Completo, com unidades de coagulação, floculação, decantação e filtração, que atende cerca de 85% da demanda total da cidade de Palmas – TO, e opera atualmente com uma vazão média de 700 L/s em um período de funcionamento diário de aproximadamente de 21 h, atendendo cerca de 225 mil habitantes.

Os resíduos utilizados nesta pesquisa foram provenientes da ETA-006, localizada na rodovia TO-050, saída para Porto Nacional, nas coordenadas

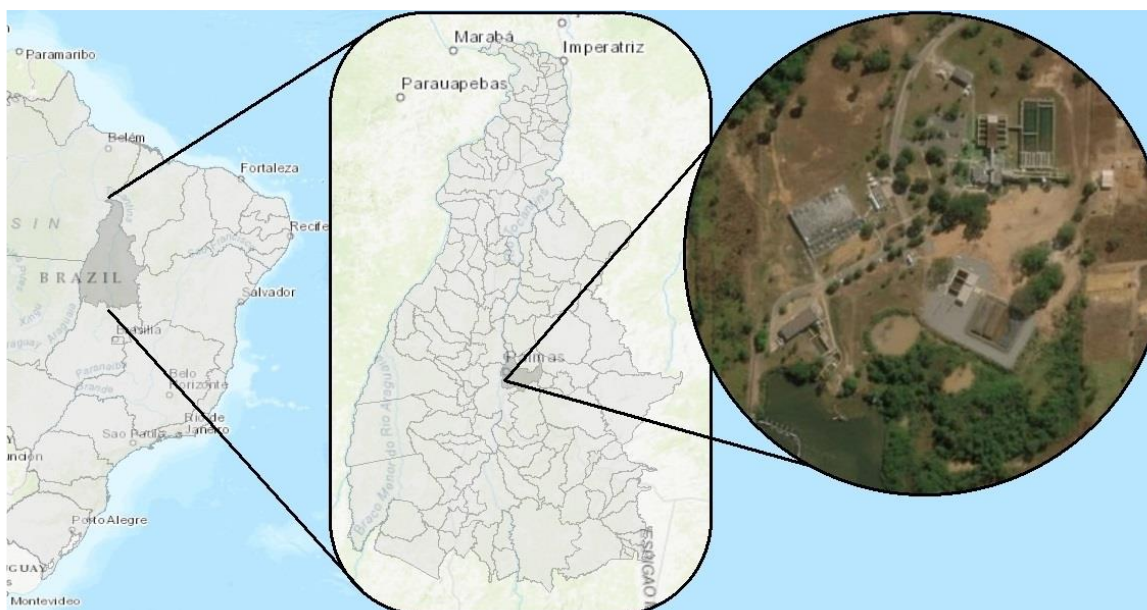
geográficas: 10° 17' 16,66' S e 48° 17' 41,69" O. A Figura 4.1 mostra foto aérea da ETA 006 e a Figura 4.2 mostra o mapa de localização da estação.

Figura 4.1 - Foto aérea da ETA 006 em Palmas - TO



Fonte: Autor (2019)

Figura 4.2 - Mapa de localização da ETA 006 em Palmas - TO.



Fonte: Autor (2019)

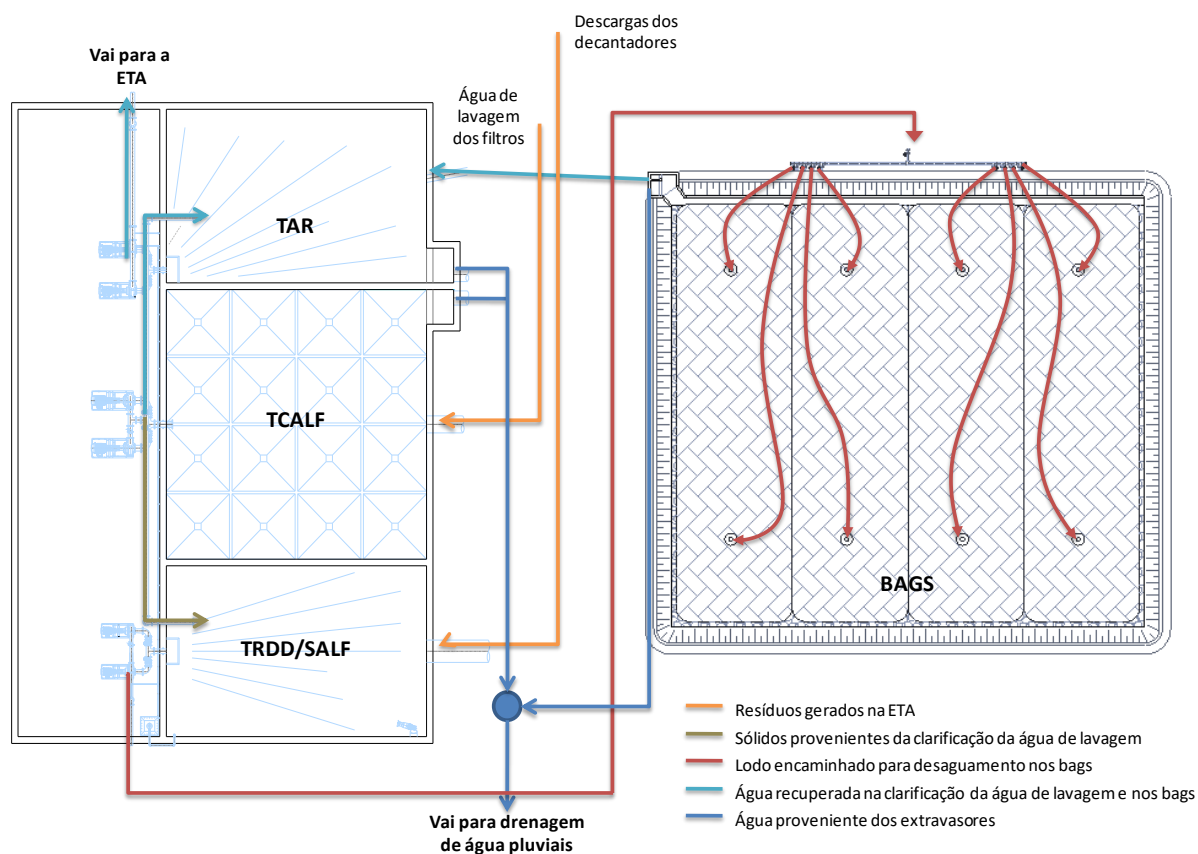
4.1.2 Sistema de Tratamento de Resíduos - ETA 006

Os resíduos gerados na ETA 006 de Palmas são provenientes das descargas dos decantadores e da lavagem dos filtros. O sistema de tratamento existente busca inicialmente a separação dos diferentes resíduos (descarga dos decantadores e lavagem dos filtros), com o objetivo de direcionar a água recuperada após o tratamento para o início do sistema da ETA, obtendo o menor gasto de produtos químicos no desaguamento do resíduo.

4.1.2.1 Funcionamento do Sistema de Tratamento de Resíduo – ETA 006

O sistema de tratamento de resíduos é composto por um Tanque de Clarificação da Água de Lavagem dos Filtros (TCALF), um Tanque de Recepção das Descargas dos Decantadores e Sólidos da Água de Lavagem dos Filtros (TRDD/SALF), Tanque de Água Recuperada (TAR) e um sistema de desaguamento de resíduos em *bags* de geotêxtil. A Figura 4.3 mostra um esquema geral e a Figura 4.4 mostra a foto aérea da Estação de Tratamento de Resíduos (ETR).

Figura 4.3 - Esquema geral da ETR da ETA-006 em Palmas - TO



Fonte: Hidrosan Engenharia (2011)

Figura 4.4 - Foto aérea da ETR da ETA 006 em Palmas - TO



Fonte: Autor (2019)

O TCALF opera em batelada, com a função de receber e clarificar a água da lavagem dos filtros. A operação desse tanque consiste na recepção dos resíduos e, após o tempo de clarificação, ocorre o bombeamento do sedimento da água de lavagem dos filtros para o TRDD/SALF e bombeamento da água clarificada para o TAR. A Figura 4.5 ilustra o TCALF, podendo se observar os poços de resíduos.

Figura 4.5 – Poço de resíduo do TCALF



Fonte: Autor (2019)

O TRDD/SALF homogeniza o resíduo das descargas dos decantadores com o sedimento da água de lavagem dos filtros através de um agitador elétrico submerso. A Figura 4.6 mostra o canal de entrada do resíduo no TRDD/SALF.

Figura 4.6 – Entrada do resíduo do decantador no TRDD/SALF



Fonte: Autor (2019)

O TAR recebe a água clarificada proveniente do TCALF e TRDD/SALF, que é bombeada para o início do processo de tratamento da ETA.

O projeto do sistema de tratamento dos resíduos previa a instalação de quatro *bags* de geotêxtil, mas atualmente existem três em funcionamento. Os *bags* recebem o resíduo proveniente do TRDD/SALF, efetuando o desaguamento.

A operação dos *bags* é efetuada de forma que o resíduo homogeneizado e armazenado no TRDD/SALF é encaminhado para um dos *bags*, até que o seu volume máximo seja atingido. Após haver uma diminuição do volume contido no *bag* com o desaguamento, este voltará a receber o resíduo. Esse procedimento é repetido até que atinja a capacidade máxima de quantidade de resíduo desaguado, sendo posteriormente feito seu descarte. A Figura 4.7 ilustra o *bag* instalado no sistema de tratamento dos resíduos e a Figura 4.8 mostra uma foto aérea do sistema de desaguamento de resíduos da ETA 006.

O resíduo acumulado no interior do *bag*, após o seu descarte, deve ser direcionado ao aterro sanitário.

Figura 4.7 - *Bag* geotêxtil instalado no sistema de tratamento dos resíduos



Fonte: Autor (2019)

Figura 4.8 - Sistema de desaguamento de resíduos da ETA 006 em Palmas - TO



Fonte: Autor (2019)

No sistema de tratamento dos resíduos é feito o uso de dois produtos químicos, o polímero sintético em emulsão e o hipoclorito de cálcio. O polímero sintético em emulsão é utilizado para auxiliar na clarificação da água de lavagem dos filtros e no desaguamento do resíduo. O hipoclorito de cálcio é utilizado para garantir

a qualidade da água recuperada no sistema, uma vez que esta será enviada para o início da ETA. As dosadoras e os produtos químicos estão instalados na unidade de apoio do sistema de tratamento dos resíduos.

4.2 Caracterização dos resíduos da ETA 006

4.2.1 Resíduos utilizados no estudo

A Tabela 4.1 mostra os resultados dos parâmetros físico-químicos analisados para caracterizar o resíduo mãe, e as três concentrações de resíduo de estudo (CRE 01, 02 e 03) utilizadas nos ensaios de bancada. O planejamento do trabalho foi realizado no sentido de serem obtidas concentrações de resíduo de estudo de 0,25; 10,13 e 20,00 g SST/L.

Os resultados mostram que parâmetros como pH, alcalinidade, COT, COD, manganês e turbidez aumentaram de acordo com o incremento da concentração de SST nos resíduos preparados.

Tabela 4.1 - Resultados da caracterização físico-química dos resíduos de estudo

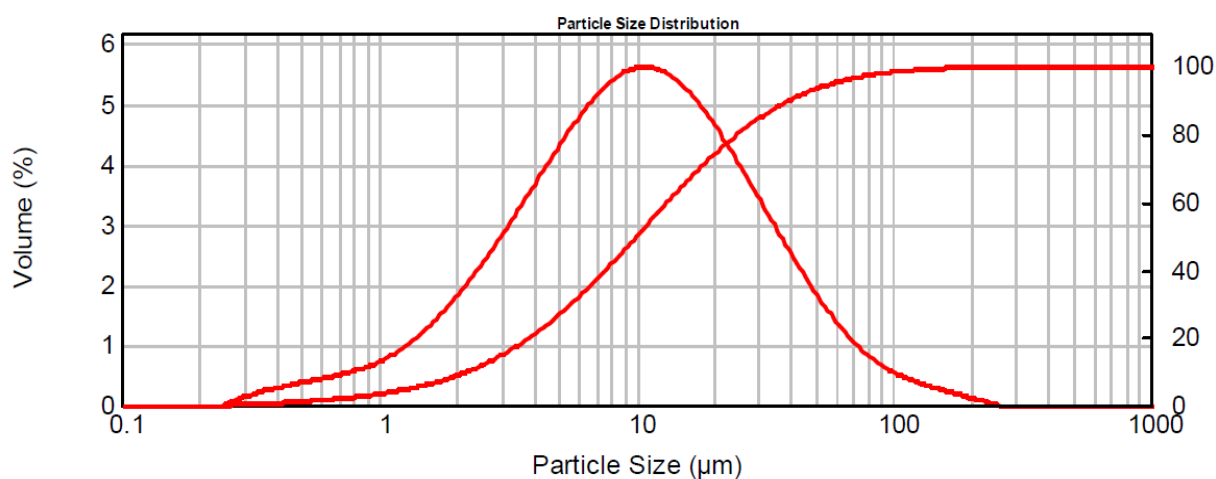
Parâmetro	Resíduo Mãe	CRE 01 (20 g/L)	CRE 02 (10.13 g/L)	CRE 03 (0.25 g/L)
Alcalinidade (mg/L)	121,12	46,12	45,90	46,97
Manganês (mg/L)	17,30	5,01	1,99	<0,01
pH	6,89	6,23	6,47	6,24
SST (g/L)	122,71	20,5	9,90	0,24
STD (mg/L)	268,00	169	121,00	178,00
ST (g/L)	122,97	23,11	9,64	0,41
COT (mg/L)	5,76	5,84	3,97	4,07
COD (mg/L)	3,30	3,78	3,86	3,57
Turbidez	118,20	32,55	14,35	305,00

Fonte: Autor (2019)

A Figura 4.9 mostra a curva granulométrica do “resíduo mãe” coletado no decantador da ETA 006 no período de 10 a 13 de abril de 2018. Os resultados

evidenciam que o resíduo mãe apresenta 15% de fração argila ($< 2 \mu\text{m}$), 55% de fração silte ($2 < x < 20 \mu\text{m}$) e 30% de fração areia ($20 < x < 200 \mu\text{m}$). Esta variação granulométrica entre material fino e grosso é um fator determinante na formação do *filter cake* (MOO-YOUNG *et al.*, 2002; MOO-YOUNG e TUCKER, 2002; LAWSON, 2008).

Figura 4.9 - Curva granulométrica do resíduo da ETA 006



Fonte: Autor (2019)

4.3 Ensaios de bancada com tecido geotêxtil

4.3.1 Planejamento experimental dos ensaios de bancada

4.3.1.1 Delineamento Fatorial Fracionado 2^{4-1} (DFF)

Nesta fase foi realizada uma verificação dos fatores de influência no desaguamento do resíduo por meio de um Delineamento Fatorial Fracionado (DFF). O objetivo deste planejamento foi estudar um conjunto de fatores (concentração de SST do resíduo, a dosagem do polímero, o gradiente de velocidade e o tempo de mistura do polímero) que pudessem ter efeito na eficiência de desaguamento, através da avaliação da turbidez do efluente filtrado e da vazão de desaguamento.

A matriz dos ensaios com os valores reais (entre parênteses) e codificados dos fatores estudados, bem como as respostas obtidas para a turbidez e vazão estão apresentadas na Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4.

Tabela 4.2 - Matriz do planejamento fatorial fracionado 2^{4-1} (valores reais e codificados) com as respostas de Turbidez (uT) e Vazão (mL/s) com o polímero catiônico

Ensaio	Fatores				Respostas	
	Concentração de SST do Resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol./gSST)	Gradiente de Velocidade (s ⁻¹)	Tempo de mistura do Polímero (s)	Turbidez do Efluente Filtrado (uT)	Vazão de Desaguamento (mL/s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,5)	-1 (50)	-1 (0,15)	171	16,9
2	1 (20)	-1 (0,5)	-1 (50)	1 (105)	4000	1,5
3	-1 (0,25)	1 (2,5)	-1 (50)	1 (105)	106	3,1
4	1 (20)	1 (2,5)	-1 (50)	-1 (0,15)	124	0,8
5	-1 (0,25)	-1 (0,5)	1 (350)	1 (105)	159	25,1
6	1 (20)	-1 (0,5)	1 (350)	-1 (0,15)	3880	1,7
7	-1 (0,25)	1 (2,5)	1 (350)	-1 (0,15)	101	9,8
8	1 (20)	1 (2,5)	1 (350)	1 (105)	9,6	3,4
9	0 (10,13)	0 (1,5)	0 (200)	0 (60)	105	2,3
10	0 (10,13)	0 (1,5)	0 (200)	0 (60)	98,6	2,2
11	0 (10,13)	0 (1,5)	0 (200)	0 (60)	101	2,1

Fonte: Autor (2019)

Observa-se na Tabela 4.2 que o ensaio 8 obteve o menor valor de turbidez do efluente filtrado (9,6 uT) e o ensaio 2 o maior valor (4000 uT). Ou seja, à medida que a concentração de SST do resíduo aumenta, a tendência da retenção do resíduo na manta de geotêxtil é potencializada com o aumento da dosagem do polímero, de maneira que favoreça a formação de flocos e não fique excedente na solução.

O ensaio 5 apresentou a maior vazão de desaguamento (25,1 mL/s). Tal efeito é caracterizado pela não formação do *filter cake*, justificada pela concentração baixa de SST (0,25 g/L) e de dosagem de polímero (0,5 mgPol./gSST). Pode-se observar o efeito contrário no ensaio 4 que apresentou a menor vazão (0,8 mL/s), justamente por ter os maiores níveis de concentração de SST do resíduo e dosagem do polímero (20 g/L e 2,5 mgPol./gSST, respectivamente). A formação do *filter cake* está ligada com a clarificação e vazão do efluente, pois sua existência retém partículas

da água passante, sendo as partículas maiores retidas no filtro (GAFFNEY *et al.*, 1999).

A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos ensaios com o polímero aniônico.

Tabela 4.3 - Matriz do planejamento fatorial fracionado 2^{4-1} (valores reais e codificados) com as respostas de Turbidez (uT) e Vazão (mL/s) com o polímero aniônico

Ensaio	Fatores				Respostas	
	Concentração de SST do Resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol./gSST)	Gradiente de Velocidade (s^{-1})	Tempo de mistura do Polímero (s)	Turbidez do Efluente Filtrado (uT)	Vazão de Desaguamento (mL/s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,5)	-1 (50)	-1 (0,15)	127	26,2
2	1 (20)	-1 (0,5)	-1 (50)	1 (105)	355	0,7
3	-1 (0,25)	1 (2,5)	-1 (50)	1 (105)	87,5	17,6
4	1 (20)	1 (2,5)	-1 (50)	-1 (0,15)	842	0,6
5	-1 (0,25)	-1 (0,5)	1 (350)	1 (105)	48,8	3,5
6	1 (20)	-1 (0,5)	1 (350)	-1 (0,15)	86,9	1,3
7	-1 (0,25)	1 (2,5)	1 (350)	-1 (0,15)	96,4	4,6
8	1 (20)	1 (2,5)	1 (350)	1 (105)	76,2	2,7
9	0 (10,13)	0 (1,5)	0 (200)	0 (60)	82	2,3
10	0 (10,13)	0 (1,5)	0 (200)	0 (60)	79,5	2,25
11	0 (10,13)	0 (1,5)	0 (200)	0 (60)	85,4	2,2

Fonte: Autor (2019)

De acordo com a Tabela 4.3, o menor valor de turbidez está presente no ensaio 5 (48,8 uT) e o maior está no ensaio 4 (842 uT), que correspondem à concentração mínima e máxima de SST dos resíduos de estudo, respectivamente. A menor e maior vazão de desaguamento foram observadas nos ensaios 4 e 1, respectivamente (0,6 mL/s e 26,2 mL/s).

Observa-se também que o melhor desempenho em relação à turbidez do efluente filtrado com polímero aniônico (ensaio 5) foi 408% superior ao melhor desempenho com polímero catiônico (ensaio 8), revelando assim que o polímero catiônico possui melhor capacidade aglutinante nas condições do ensaio 8.

Tabela 4.4 - Matriz do planejamento fatorial fracionado 2^{4-1} (valores reais e codificados) com as respostas de Turbidez (uT) e Vazão (mL/s) com o polímero não-iônico

Ensaio	Fatores				Respostas	
	Concentração de SST do Resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol./gSST)	Gradiente de Velocidade (s-1)	Tempo de mistura do Polímero (s)	Turbidez do Efluente Filtrado (uT)	Vazão de Desaguamento (mL/s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,5)	-1 (50)	-1 (0,15)	128	16,9
2	1 (20)	-1 (0,5)	-1 (50)	1 (105)	905	0,7
3	-1 (0,25)	1 (2,5)	-1 (50)	1 (105)	120	7,9
4	1 (20)	1 (2,5)	-1 (50)	-1 (0,15)	421	0,5
5	-1 (0,25)	-1 (0,5)	1 (350)	1 (105)	94,8	6,3
6	1 (20)	-1 (0,5)	1 (350)	-1 (0,15)	880	0,6
7	-1 (0,25)	1 (2,5)	1 (350)	-1 (0,15)	68,3	9,7
8	1 (20)	1 (2,5)	1 (350)	1 (105)	243	1
9	0 (10,13)	0 (1,5)	0 (200)	0 (60)	796	1,4
10	0 (10,13)	0 (1,5)	0 (200)	0 (60)	799	1,5
11	0 (10,13)	0 (1,5)	0 (200)	0 (60)	790	1,6

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 4.4 observa-se que a menor turbidez do efluente filtrado foi observada no ensaio 3. Tal resultado é 1250% superior ao ensaio 8 com polímero catiônico (Tabela 4.2) e 246% superior ao ensaio 5 com polímero aniônico (Tabela 4.3). Isto revela que o polímero não-iônico possuiu menor desempenho na aglutinação das partículas e consequente retenção de sólidos.

Analisando-se os resultados da Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4, foi possível calcular os efeitos dos quatro fatores estudados, os quais estão apresentados na Tabela 4.5, Tabela 4.6 e Tabela 4.7.

Tabela 4.5 - Efeito dos fatores estudados no planejamento fracionado 2^{4-1} sobre a turbidez e a vazão nos ensaios com polímero catiônico

Fatores	Turbidez do Efluente Filtrado (uT)				Vazão de Desaguamento (mL/s)			
	Efeito	Erro Padrão	t	p-valor	Efeito	Erro Padrão	t	p-valor
Média	1068,83	426,34	2,51	0,05	7,79	1,81	4,29	0,01
Curvatura	-1934,58	1632,74	-1,18	0,29	-11,18	6,95	-1,61	0,17
Concentração de SST do resíduo (g/L)	1869,15	852,67	2,19	0,08	-11,87	3,63	-3,27	0,02
Dosagem de Polímero (mgPol./gSST)	-1967,35	852,67	-2,31	0,07	-7,03	3,63	-1,94	0,11
Gradiente de velocidade (s^{-1})	-62,85	852,67	-0,07	0,94	4,43	3,63	1,22	0,28
Tempo de mistura do polímero (s)	-0,35	852,67	0,00	1,00	0,98	3,63	0,27	0,80

Fonte: Autor (2019)

Tabela 4.6 - Efeito dos fatores estudados no planejamento fracionado 2^{4-1} sobre a turbidez e a vazão nos ensaios com polímero aniônico

Fatores	Turbidez do Efluente Filtrado (uT)				Vazão de Desaguamento (mL/s)			
	Efeito	Erro Padrão	t	p-valor	Efeito	Erro Padrão	t	p-valor
Média	214,98	64,19	3,35	0,02	7,15	2,29	3,12	0,03
Curvatura	-265,35	245,82	-1,08	0,33	-9,80	8,77	-1,12	0,31
Concentração de SST do resíduo (g/L)	250,10	128,37	1,95	0,11	-11,65	4,58	-2,54	0,05
Dosagem de polímero (mgPol./gSST)	121,10	128,37	0,94	0,39	-1,55	4,58	-0,34	0,75
Gradiente de velocidade (s^{-1})	-275,80	128,37	-2,15	0,08	-8,25	4,58	-1,80	0,13
Tempo de mistura do polímero (s)	-146,20	128,37	-1,14	0,31	-2,05	4,58	-0,45	0,67

Fonte: Autor (2019)

Tabela 4.7 - Efeito dos fatores estudados no planejamento fracionado 2⁴⁻¹ sobre a turbidez e a vazão nos ensaios com polímero não-iônico

Fatores	Turbidez do Efluente Filtrado (uT)				Vazão de Desaguamento (mL/s)			
	Efeito	Erro Padrão	t	p-valor	Efeito	Erro Padrão	t	p-valor
Média	357,51	61,85	5,78	<0,01	5,45	0,95	5,75	<0,01
Curvatura	874,98	236,87	3,69	0,01	-7,90	3,63	-2,18	0,08
Concentração de SST do resíduo (g/L)	509,48	123,70	4,12	0,01	-9,50	1,90	-5,01	<0,01
Dosagem de polímero (mgPol./gSST)	-288,88	123,70	-2,34	0,07	-1,35	1,90	-0,71	0,51
Gradiente de velocidade (s ⁻¹)	-71,98	123,70	-0,58	0,59	-2,10	1,90	-1,11	0,32
Tempo de mistura do polímero (s)	-33,63	123,70	-0,27	0,80	-2,95	1,90	-1,56	0,18

Fonte: Autor (2019)

Analisando-se os resultados da Tabela 4.5, Tabela 4.6 e Tabela 4.7, observou-se que o fator concentração de SST do resíduo (g/L) foi estatisticamente significativo nos três planejamentos ($p < 0,1$). A concentração de SST do resíduo apresentou efeito positivo para a resposta turbidez e para a resposta vazão o efeito foi negativo (Tabela 4.5, Tabela 4.6 e Tabela 4.7).

O fator dosagem de polímero (mgPol./gSST) exerceu efeito estatisticamente significativo nos planejamentos experimentais que utilizaram os polímeros catiônico e não-iônico (Tabela 4.5 e Tabela 4.7). A dosagem de polímero apresentou efeito negativo para resposta turbidez nos ensaios com polímeros catiônico e não-iônico (Tabela 4.5 e Tabela 4.7) e para a resposta vazão o efeito foi também negativo.

Guanaes (2009), em seus ensaios, também observou menor turbidez do filtrado e maior desaguamento quando utilizou o polímero catiônico como condicionante químico.

Vale ressaltar que o planejamento experimental com polímero aniônico (Tabela 4.6) não foi estatisticamente significativo com $p\text{-valor} < 0,1$, o que evidencia a hipótese da necessidade de ajuste dos níveis adotados.

Através dos resultados pode-se afirmar que o Gradiente de Velocidade (s⁻¹) não apresentou resultados com significância estatística a 10%. O fator Tempo de Mistura do Polímero (s), apresentado na Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4, não foi estatisticamente significativo nos três planejamentos ($p > 0,1$).

Para efeito de estabelecer um procedimento no planejamento do Delineamento de Faces Centradas (DFC) do teste de bancada com tecido geotêxtil foram adotados gradiente de velocidade e tempo de mistura do polímero em valores de 200 s⁻¹ e 60 s, respectivamente. As faixas de concentração de SST do resíduo e a dosagem do polímero foram as mesmas do Delineamento Fracionado devido a significância estatística comprovada nos ensaios.

4.3.1.2 Delineamento de Faces Centradas 2² (DFC)

Em função dos resultados obtidos no item anterior, o Delineamento de Faces Centradas (DFC) foi realizado para a avaliação do desaguamento do resíduo da ETA 006, considerando os fatores Concentração de SST do Resíduo e Dosagem de Polímero. O planejamento teve como objetivo escolher o melhor polímero (catiônico, aniônico e não-iônico) em função da eficiência de desaguamento, analisada pelo parâmetro de turbidez no efluente filtrado e a vazão de desaguamento.

A matriz dos ensaios com os valores codificados e reais (entre parênteses) dos fatores estudados, bem como as respostas obtidas para a turbidez do efluente filtrado e a vazão de desaguamento estão apresentadas na Tabela 4.8, Tabela 4.9 e Tabela 4.10.

Tabela 4.8 - Matriz do DFC com níveis codificados e reais dos fatores com as respostas de vazão e turbidez para o polímero catiônico

Ensaio	Fatores		Respostas	
	Concentração de SST do resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol./gSST)	Turbidez (uT)	Vazão (mL/s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,50)	25,1	10,33
2	1 (20)	-1 (0,50)	295	1,3
3	-1 (0,25)	1 (2,50)	19,6	9,35
4	1 (20)	1 (2,50)	63,5	7,41
5	-1 (0,25)	0 (1,5)	19	6,5
6	1 (20)	0 (1,5)	113	5,27
7	0 (10,13)	-1 (0,50)	112	2,06
8	0 (10,13)	1 (2,50)	14,7	8,04
9	0 (10,13)	0 (1,5)	9,03	6,27
10	0 (10,13)	0 (1,5)	17,7	6,09
11	0 (10,13)	0 (1,5)	14,9	5,59

Fonte: Autor (2019)

Tabela 4.9 - Matriz do DFC com níveis codificados e reais dos fatores com as respostas de vazão e turbidez para o polímero aniônico

Ensaio	Fatores		Respostas	
	Concentração de SST do resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol./gSST)	Turbidez (uT)	Vazão (mL/s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,50)	54	8,95
2	1 (20)	-1 (0,50)	256	1,82
3	-1 (0,25)	1 (2,50)	26,4	7,34
4	1 (20)	1 (2,50)	84,1	2,98
5	-1 (0,25)	0 (1,5)	36,3	6,62
6	1 (20)	0 (1,5)	57,3	3,69
7	0 (10,13)	-1 (0,50)	182	2,83
8	0 (10,13)	1 (2,50)	41,7	2,47
9	0 (10,13)	0 (1,5)	43,2	2,55
10	0 (10,13)	0 (1,5)	47,5	2,61
11	0 (10,13)	0 (1,5)	44,9	2,44

Fonte: Autor (2019)

Tabela 4.10 - Matriz do DFC com níveis codificados e reais dos fatores com as respostas de vazão e turbidez para o polímero não-iônico

Ensaio	Fatores		Respostas	
	Concentração de SST do resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol./gSST)	Turbidez (uT)	Vazão (mL/s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,50)	49	6,86
2	1 (20)	-1 (0,50)	383	1,26
3	-1 (0,25)	1 (2,50)	28	6,34
4	1 (20)	1 (2,50)	86,6	2,15
5	-1 (0,25)	0 (1,5)	32,5	6,92
6	1 (20)	0 (1,5)	88,3	2,53
7	0 (10,13)	-1 (0,50)	172	2,12
8	0 (10,13)	1 (2,50)	40,6	2,04
9	0 (10,13)	0 (1,5)	53	2,55
10	0 (10,13)	0 (1,5)	40,8	2,43
11	0 (10,13)	0 (1,5)	40,6	2,18

Fonte: Autor (2019)

Dentre os polímeros, o catiônico favoreceu a maior vazão de desaguamento (10,33 mL/s) no ensaio 1 (ver Tabela 4.8). A menor turbidez do efluente filtrado dentre todos os ensaios foi registrada também no planejamento do polímero catiônico (9,03 uT) no ensaio 9 (ver Tabela 4.8), com dosagem de 10,13 g/L e concentração de resíduo de 1,5 mgPol./gSST.

As análises dos resultados obtidos nos ensaios de bancada em geotêxtil evidenciam que o polímero catiônico foi o mais indicado para o condicionamento químico do resíduo da ETA 006, já que apresentou a maior vazão de desaguamento e menor turbidez do efluente filtrado nas mesmas condições de ensaio dos outros polímeros.

A Tabela 4.11 apresenta os coeficientes de regressão, bem como o desvio padrão e valores de t e p para os fatores que foram estatisticamente significativos a 10% de significância. Verificou-se que a concentração de SST do resíduo utilizado no desaguamento foi estatisticamente significativa na faixa estudada de 0,25 a 20 g/L. Desta forma, os responsáveis pelo desaguamento foram a Concentração de SST do Resíduo e a Dosagem de Polímero.

Tabela 4.11 - Coeficiente de regressão e desvio padrão para os ensaios com polímero catiônico

Fatores	Turbidez (uT)				Vazão (mL/s)			
	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t	p-valor	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t	p-valor
Média	16,97	9,30	1,82	0.1277	5,53	0,83	6,67	0,0011
x_1 (L)	67,97	7,40	9,18	* 0.0003	-2,03	0,66	-3,08	* 0,0275
x_1^2 (Q)	44,40	11,39	3,90	* 0.0114	1,03	1,02	1,01	0,3568
x_2 (L)	-55,72	7,40	-7,53	* 0.0007	1,85	0,66	2,80	* 0,0378
x_2^2 (Q)	41,75	11,39	3,67	* 0.0145	0,20	1,02	0,19	0,8546
$x_1 \cdot x_2$	-56,50	9,07	-6,23	* 0.0016	1,77	0,81	2,19	* 0,0799

Nota: L – Termos Lineares; Q – Termos Quadráticos; * P-valor $\leq 0,10$. Fonte: Autor (2019)

Considerando-se os parâmetros significativos com $p\text{-valor} \leq 0,10$, obteve-se as Equações 1 e 2, que representam a Turbidez (uT) e a Vazão de Desaguamento (mL/s) em função dos fatores Concentração de SST do Resíduo (X_1) e a Dosagem do Polímero (X_2).

Uma alternativa para simplificar o modelo, realizada com amplo aval da literatura, consiste em excluir os coeficientes de regressão com pequena ou nenhuma influência sobre o resultado do ajuste final, e assim se obter um modelo reparametrizado (Rodrigues e lemma, 2014).

$$\text{Turbidez (uT)} = 16,97 + 67,97 x_1 + 44,40 x_1^2 - 55,72 x_2 + 41,75 x_2^2 - 56,50 x_1 x_2 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{Vazão de Desaguamento (mL/s)} = 6,20 - 2,03 x_1 + 1,85 x_2 + 1,77 x_1 x_2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da Análise de Variância (ANOVA), apresentada na Tabela 4.12. O $F_{\text{calculado}}$ para a regressão foi altamente significativo, sendo 12,7 vezes maior que o F_{tabelado} para a turbidez e 2,7 vezes para a vazão, e o percentual de variação explicada pelo modelo foi adequado ($R^2 = 97,77\%$ para turbidez e $77,97\%$ para vazão de desaguamento).

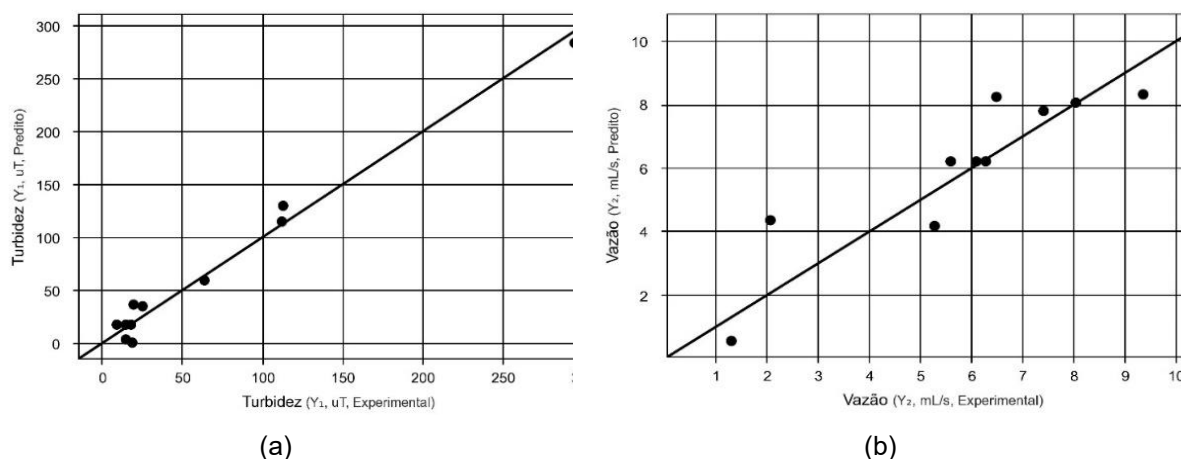
Tabela 4.12 - Análise de Variância (ANOVA) para a Turbidez e a Vazão dos ensaios com polímero catiônico

Fonte de variação	Soma dos quadrados		Graus de liberdade		Quadrado médio		F _{calculado}		P-valor	
	Turbidez	Vazão	Turbidez	Vazão	Turbidez	Vazão	Turbidez	Vazão	Turbidez	Vazão
Regressão	71938,7	57,9	5	3	14387,7	19,3	43,8	8,3	* <0,001	* 0,01
Resíduos	1643,8	16,4	5	7	328,8	2,3				
Total	73582,5	74,3	10	10						

Nota: Turbidez: *P-valor<0,10; $R^2 = 97,77\%$; $F_{5;5;0,10} = 3,45$ / Vazão: *P-valor<0,10; $R^2 = 77,97\%$; $F_{3;7;0,10} = 3,07$. Fonte: Autor (2019)

A Figura 4.10 indica boa concordância entre os valores preditos e os experimentais, indicando a eficácia do modelo.

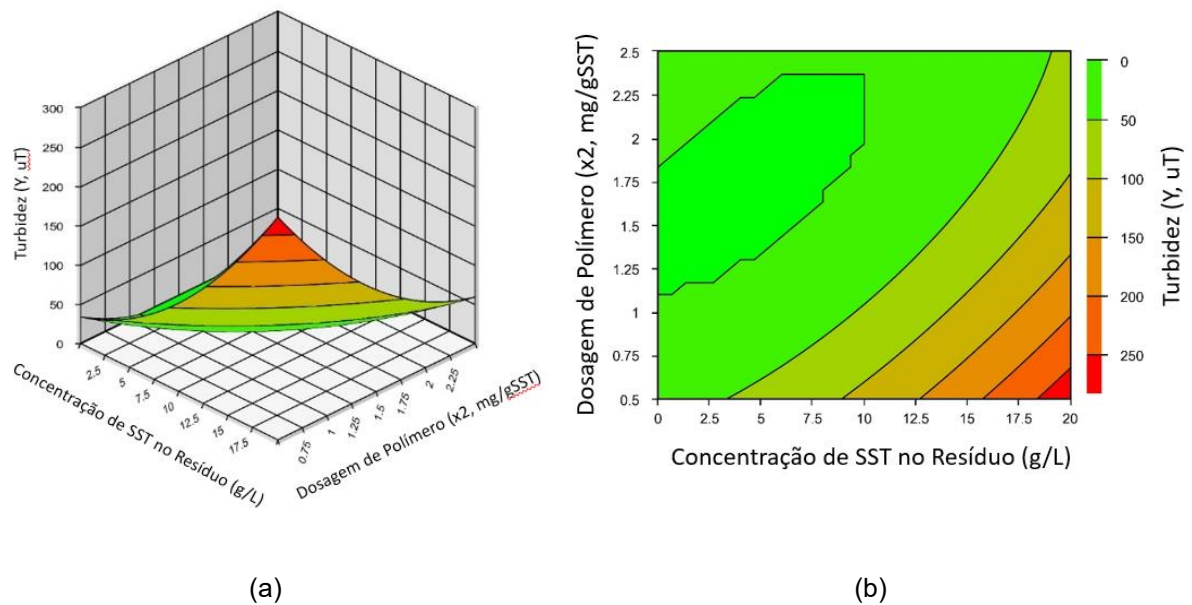
Figura 4.10 - Valores experimentais *versus* valores preditos pelo modelo para a resposta turbidez (a) e vazão (b)



Fonte: Autor (2019)

Considerando a variabilidade inerente ao resíduo, pode-se concluir que o modelo se ajustou bem aos dados experimentais, sendo possível construir a superfície de resposta, conforme a Figura 4.11 e a Figura 4.12.

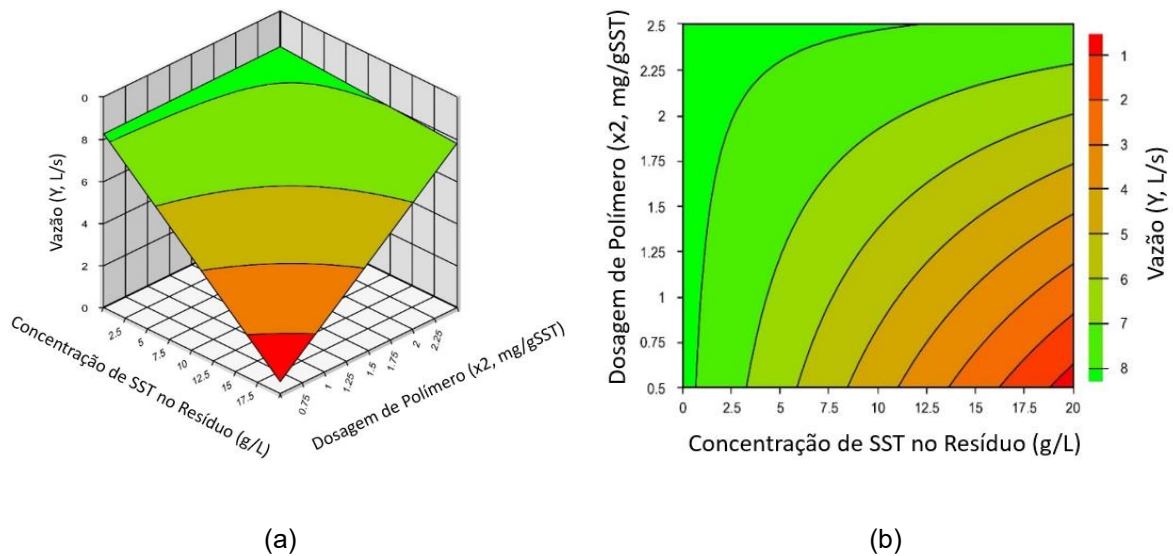
Figura 4.11 - Superfície de resposta (a) e curvas de contorno (b) para a resposta turbidez



Fonte: Autor (2019)

Através das superfícies de resposta geradas pelos modelos da Figura 4.11, pode-se obter as condições de concentração de resíduo e dosagem de polímero que resultem em menor turbidez. É possível verificar através das curvas de contorno que para a concentração de resíduo, a faixa ótima é de até 10 g/L e para a dosagem de polímero catiônico entre 1.22 mg/gSST e 2.35 mg/gSST. As condições otimizadas poderiam ser obtidas derivando-se as equações para se determinar o ponto crítico, entretanto, buscando-se aplicabilidade em escala real sugere-se variar a dosagem de condicionante químico em função da concentração de resíduo, uma vez que este último parâmetro é variável se tratando de escala real em ETA.

Figura 4.12 - Superfície de resposta (a) e curvas de contorno (b) para a resposta vazão



Fonte: Autor (2019)

As curvas de contorno e a superfície de resposta da Figura 4.12 apresentam o comportamento da resposta vazão em função dos fatores concentração de resíduo e dosagem de polímero. É importante observar que concentrações mais baixas de resíduo levam a melhores vazões, no entanto, a fim de se obter condições otimizadas para maiores vazões, deve-se elevar as dosagens de polímero catiônico quando o resíduo é mais concentrado, revelando interdependência entre as variáveis. A faixa ótima de concentração de condicionante químico varia com a concentração de resíduo, e levando em conta que o resíduo a ser desaguado em bag geotêxtil possui elevado teor de sólidos, valores a partir de 2.29 mg/gSST seriam ideais para resíduo com concentração em torno de 20 g/L.

5 CONCLUSÕES

- A concentração de SST do resíduo e a dosagem do condicionante químico impactam na eficiência do sistema de desaguamento do resíduo de ETA por tecido geotêxtil. Os testes estatísticos demonstraram que o gradiente de velocidade e o tempo de mistura do polímero não possuem comportamento definido ao se modificar os níveis. Conclui-se que estas variáveis na verdade

são constantes no processo de desaguamento, podendo ter valores fixos na operação de uma estação de tratamento de resíduos.

- Dentre os condicionantes químicos estudados, o polímero catiônico possuiu melhor desempenho no Delineamento de Faces Centradas, com turbidez do efluente filtrado de 9,03 uT e vazão de desaguamento de 10,13 g/L, dentro de uma faixa de dosagem aplicável na avaliação estatística, entre 0,5 e 2,5 mgPol./gSST .
- Os polímeros aniônico e não-iônico apresentaram comportamento satisfatório e aplicável na floculação do resíduo, com melhores resultados de 26,4 e 28 uT para a turbidez do efluente filtrado e 8,95 e 6,92 mL/s para a vazão de desaguamento do resíduo, respectivamente. Tais resultados, entretanto, comprovam que para os mesmos níveis adotados nos ensaios, o polímero catiônico favoreceu melhor desempenho.
- Embora este trabalho apresente resultados estatisticamente significativos e aplicáveis nas operações de ETAs, estudos em escala piloto devem ser feitos para validação do modelo apresentado, acrescido de modelo pressurizado. A definição dos níveis de dosagem de condicionante químico e utilização de geossintéticos dependem também de outros fatores específicos de cada ETA, e o responsável operacional deve analisar os seus impactos no dimensionamento do sistema.

REFERÊNCIAS

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 115–122, 2013.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19. ed., Washington, USA., 1998.

ASCE; AWWA. **Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residual**. New York, 1996.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT (2004a). NBR 10.004 – Resíduos sólidos - Classificação, Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT. (2004b) NBR 10.005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT. (2004c) NBR 10.006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT. (2004d) NBR 10.007 – Amostragem de resíduos sólidos - Classificação, Rio de Janeiro, Brasil.

AWWA; ASCE, **Water treatment plant design**. 2 ed. New York: Mc Graw Hill, 1990.

BRASIL, Leis Decretos, etc. Ministério da Saúde. *Portaria MS 2914*. 12 de Dezembro de 2011, Brasília, Brasil.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. *Resolução 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. Brasília, DF, 2005

BRASIL. Crimes Ambientais: *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. Brasília, DF, 1998.

BRASIL. Política Nacional do Meio Ambiente. *Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981*. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF, 1981.

BRASIL. Política Nacional dos Resíduos Sólidos. *Lei 12.305 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.

CAMP, T. R.; STEIN, P. C. Velocity gradients and internal work in fluid motion. **Journal of the Boston Society of Civil Engineers**, Boston, v. 30, n. 1, p. 219-237, 1943.

CASTRO, N. P. B., MARTINS, P. M., STEPHENS, T.; MELO, L. C. Q. C. Tests to evaluate dewatering and filtration efficiency for geotextile tubes design. **Geosynthetics**, Roseville, v.1, n. 1, 2009.

CORNWELL, D. A.; ROTH, D. K. **Water treatment principles plant residuals management**. 6 ed. New York: Mc Graw-Hill, 2011.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P.E.N. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 3. ed. São Carlos: Rima, 2017. 1246 p.

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.

GAFFNEY, D. A., MARTIM, S.M., M.H., BENNERT, T.A. **Dewatering Contaminated, fine-grained material using geotextiles**. Geosolutions, v. 1, n. 1, p. 51-59, 1999.

GUANAES, E. A. **Análise do Desaguamento do Resíduo 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.

GUIMARÃES, G. C. **Estudo do Adensamento e Desidratação dos Resíduos Gerados na ETA-Brasília**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. ENC/FT/UnB, 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**, v. 21, n. 5, p. 310–320, 2014.

HAN, M. Y.; LAWLER, D. F. The (relative) insignificance of G in flocculation. **Journal American Water Works Association**, Denver, v. 84, n. 10, p. 79-91, 1992.

HIDROSAN ENGENHARIA SS LTDA (2007). Projeto Hidráulico de Reforma e Ampliação da ETA 006 de Palmas – TO.

HIDROSAN ENGENHARIA SS LTDA (2011). Projeto Hidráulico do Sistema de Tratamento de Resíduos Gerados em ETA de Ciclo Completo.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 444p. Editora Átomo. Campinas – SP, 2005.

MOO-YOUNG, H. K.; TUCKER, W. R. Evaluation of vacuum filtration testing for geotextile tubes. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 20, n. 3, p. 191–212, 2002.

REALI, M. A. P. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Resíduos e Estações de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro: Rima, ABES. 240 p, 1999.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 3. Ed. Campinas: Editora Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2014.

SATYAMURTHY R., BHATIA S.K.. Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles. **Geosynthetics International**. v. 2,. n. 1. p. 83-96, 2009.

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, 126p, 2010.

VIANNA, M. R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 3ª ed. Belo Horizonte: Editora Imprimatur, 1997.