

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## USO DA METODOLOGIA DE SUPERFICIE DE RESPOSTA PARA AVALIAÇÃO DO DESAGUAMENTO DE RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM FILTRAÇÃO GEOTÊXTIL

\* Giulliano Guimarães Silva <sup>1</sup>  
Angela Di Bernardo Dantas <sup>2,5</sup>  
Sérgio Carlos Bernardo Queiroz <sup>3</sup>  
Maria Isabel Rodrigues <sup>4</sup>  
Mateus A. Roveda Guimarães <sup>5</sup>

## USE OF THE RESPONSE SURFACE METHODOLOGY FOR THE EVALUATION OF THE DEWATERING OF WASTE OF WATER TREATMENT STATION IN GEOTEXTILE FILTRATION

Recibido el 3 de mayo de 2019; Aceptado el 4 de mayo 2020

### Abstract

Despite the growing concern with environmental impact, many water treatment plants in Brazil still do not have mechanisms to ensure the correct management of the waste generated in their treatment process. It is a residue with low solids content and with challenges regarding its management, final disposal or use. Confinement systems in geotextile tubes have been applied for this purpose in recent years, but it is still necessary to expand knowledge about its operation. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of the variables in the process of ETA residue dewatering through the planning of experiments and process optimization. The study was divided into two stages: characterization of the waste treatment system, collection, preparation and characterization of waste from the ETA 006 water treatment plant (Palmas - TO) and bench trials with geotextile fabric. The results showed that the initial suspended total solids concentration (SST) of the residue and the dosage of chemical conditioning, in this specific case being the cationic polymer, influenced the amount of material retained by the geotextile tissue and the time of Dewatering. It was also observed that the studied SST concentration scale in the residue and chemical conditioning dosage were effective since the results were statistically significant. The results of the experimental planning showed that in the bench tests the geotextile with an opening of 200  $\mu\text{m}$  weft (GT1) had better performance in the removal of filtrate turbidity and dewatering time compared with the results obtained with the geotextile with weft opening of 400  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** chemical conditioning, dewatering, geotextile fabric, experimental design, ETA residue.

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade de Ribeirão Preto, Brasil.

<sup>3</sup> Universidade do Tocantins, Brasil.

<sup>4</sup> Protimiza Consultoria e Treinamento em Projeto Experimental e Otimização de Processos, Campinas, SP, Brasil.

<sup>5</sup> Hidrosan Engenharia.

\* *Autor correspondente:* Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), 706 SUL AL 21 Bloco B APTO 707, Plano Diretor Sul, Palmas - TO, 77021-090- Brasil. Email: [giullianogsilva@gmail.com](mailto:giullianogsilva@gmail.com)

## Resumo

Apesar da crescente preocupação com o impacto ambiental, muitas estações de tratamento de água no Brasil ainda não dispõem de mecanismos que garantam o correto gerenciamento dos resíduos gerados em seu processo de tratamento. É um resíduo com baixo teor de sólidos, de difícil operação, transporte, disposição final ou aproveitamento. Sistemas de confinamento em tubos em geotêxtil vêm sendo aplicados com esta finalidade nos últimos anos, porém ainda é necessário ampliar o conhecimento acerca de seu funcionamento. Sendo assim, objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito das variáveis no processo de desaguamento do resíduo de ETA por meio do planejamento de experimentos e otimização de processos. O estudo foi dividido em duas etapas: caracterização do sistema de tratamento de resíduos, coleta, preparo e caracterização dos resíduos da estação de tratamento de água ETA 006 (Palmas – TO) e ensaios de bancada com tecido geotêxtil. Os resultados mostraram que a concentração de sólidos suspenso total (SST) inicial do resíduo e a dosagem de condicionante químico, nesse caso o polímero catiônico, exerceram influência na quantidade de material retido pelo tecido geotêxtil e no tempo de desaguamento. Observou-se ainda que as faixas estudadas de concentração SST no resíduo e dosagem de condicionante químico foram eficazes uma vez que os resultados foram estatisticamente significativos. Já os resultados do planejamento experimental demonstraram que nos ensaios de bancada o geotêxtil com abertura da trama de 200  $\mu\text{m}$  (GT1) teve melhor desempenho na remoção da Turbidez do Filtrado e tempo de desaguamento comparados com os resultados obtidos com o geotêxtil com abertura da trama de 400  $\mu\text{m}$ .

**Palavras-chave:** condicionante químico, desaguamento, tecido geotêxtil, planejamento experimental, resíduo de ETA.

---

## Introdução

No Brasil os resíduos gerados nos serviços de Saneamento (resíduos de ETA e ETE) não podem ser despejados em corpos d'água ou no solo sem autorização dos órgãos de meio ambiente e de controle da poluição, por causarem impactos irreversíveis. Dentre os impactos que os resíduos de estação de tratamento de água (ETA) podem causar nos mananciais, estão a perda da qualidade de água pelo incremento de sólidos e microrganismos removidos nos processos e operações de tratamento de água, alterações no ecossistema aquática e redução do volume útil do corpo aquático devido ao assoreamento e possíveis efeitos tóxicos sobre a saúde da população (ASCE & AWWA, 1996; Reali, 1999; Andreoli, 2001; Guimarães *et al.*, 2014; Di Bernardo *et al.*, 2017; Avancini, 2017).

Alguns autores relatam que o uso de tubos geotêxteis em sistemas de desaguamento de resíduos de saneamento ou rejeitos com alto teor de água em relação ao teor de sólidos, como resíduos gerados em decantadores/flotadores e lavagem dos filtros de estações de tratamento de água, resíduos de mineração, dentre outros diferentes processos, tem aumentado nos últimos anos. Tal crescimento se dá por apresentar como tecnologia eficiente e viável do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Os sistemas geotêxtis possibilitam o desaguamento da fase líquida e a retenção da fase sólida do resíduo, surgindo como uma alternativa de solucionar a problemática do desaguamento desses resíduos (Fowler *et al.*, 2002; Lawson, 2008; Moo-Young *et al.*, 2002; Moo-Young e Tucker, 2002; Muthukumaran e Ilamparuthi, 2006; Satyamurthy e Bhatia, 2009; Avancini, 2017).

Para avaliar a eficiência de sistemas fechados com geotêxtil no desaguamento de um determinado material de modo a possibilitar conhecer o desempenho filtrante do geotêxtil e determinar a necessidade ou não de aditivos como reagentes e despoluentes a serem adicionados, é necessário a realização de ensaios de laboratório e/ou de campo.

Dentre estes ensaios, os mais frequentes são os ensaios de bancada (teste de cone), que permitem uma avaliação preliminar analisando o geotêxtil e eventual condicionamento químico, e os de bolsa que são utilizados para avaliar o enchimento e o processo de desaguamento (Lawson, 2008).

Os ensaios de bancada ou teste de cone é um ensaio simples e rápido, permitindo uma primeira análise das percentagens de material retido no geotêxtil utilizado e análise da qualidade do efluente obtido. Pode também ser empregado para avaliar a necessidade de se utilizar um aditivo químico para o condicionamento do material a ser desaguado, podendo analisar a dosagem a ser adicionada ao material.

Os aditivos geralmente são utilizados como floculantes, a fim de auxiliar a filtração e o desaguamento de resíduos por meio do geotêxtil. Sem o seu uso, o geotêxtil pode não conseguir reter as partículas finas, principalmente em materiais argilosos com baixas concentrações de sólidos (Satyamurthy e Bhatia, 2009). Eles permitem melhorar a qualidade do efluente desde o início do processo. Este ensaio necessita de poucos equipamentos para ser executado, podendo por isso ser realizado em campo ou em laboratório.

É importante que se conheça as características do resíduo, o tecido do geotêxtil adequado e o comportamento do condicionante químico a ser empregado ante ao dimensionamento do sistema de desidratação do resíduo de ETA. Tal conhecimento possibilita analisar a eficiência da técnica, a escolha do polímero e o tipo de geotêxtil.

Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos das variáveis de influência no processo de desaguamento do resíduo de estação de tratamento de água por meio do planejamento experimental estatístico. Nesse trabalho foi possível realizar a caracterização do resíduo, estudar os efeitos das variáveis de desaguamento (concentração de SST inicial do resíduo e dosagem de polímero) e avaliar o desempenho de dois geotêxteis com tecidos distintos entre si (GT1 e GT2) e dos polímeros utilizados (catiônico, aniônico e não-iônico).

## Materiais e métodos

Conforme ilustrado na Figura 1, na ETAPA I foi realizada a coleta, preparo e caracterização dos resíduos produzidos na ETA e a ETAPA II foram executados os ensaios de bancada em geotêxtil para definição das melhores condições de dosagens dos condicionantes químicos no desaguamento em geotêxtil.

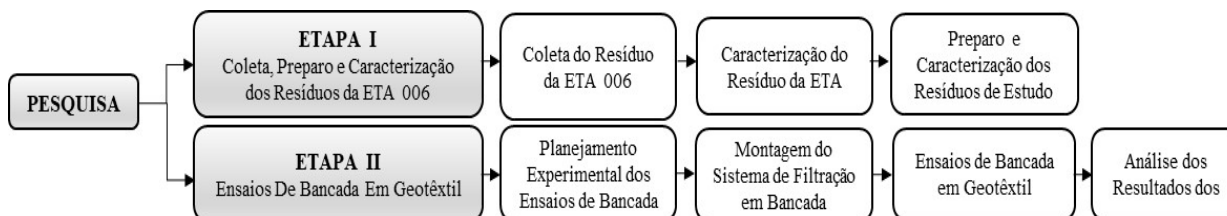


Figura 1. Fluxograma das Etapas da Pesquisa

Para realização dos ensaios da bancada, a Tabela 1 apresenta os parâmetros físico-químicos, unidades, métodos de medição e limites de detecção realizadas segundo os métodos indicados no APHA (2012). A Tabela 2 mostra a descrição dos produtos químicos utilizados como condicionantes químicos na pesquisa e a Tabela 3 estão apresentadas as propriedades físicas dos geotêxteis utilizados para o desaguamento dos resíduos nos ensaios de bancada.

Tabela 1. Parâmetros, métodos e limites de medição

Parâmetro	Unidades	Método	Limite de detecção
Alumínio	mg/L Al	EAA-Forno de grafite	0.001
Alcalinidade	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Titrimétrico	1
Carbono orgânico total	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo	0.1
Carbono orgânico dissolvido	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo	0.1
Distribuição e tamanho das partículas	mm	Espalhamento de luz laser de baixo ângulo	0.02
Ferro	mg/L Fe	EAA - Chama	0.01
Manganês	mg/L Ma	EAA - Chama	0.001
Morfologia das partículas	micrometro	Microscopia eletrônica de varredura	10 µm
pH	Adimensional	Potenciométrico	0.01
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Teor de sólidos	%	Gravimétrico	1
Turbidez	uT	Nefelométrico	0.1

**Tabela 2.** 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 muito alto	-	-
Polímero Sintético Aniônico	Flonex 923 SH	Sólido granulado	Alto Muito 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).

**Tabela 3.** Propriedades físicas dos geotêxteis ensaiados.

Propriedades	Geotêxtil 1 (GT1): PP 105/105 DW	Geotêxtil 2 (GT2) PP 105/105 HDW
Matéria-prima	Polipropileno	Polipropileno
Massa por unidade de área (EN ISO 9864)	445 g/m <sup>2</sup>	440 g/m <sup>2</sup>
Resistência a tração nominal (EN ISO 10.319)	≥ 105 kN/m	≥ 105 kN/m
Deformação na Resistência Nominal (EN ISO 10.319)	≤ 9%	≤ 10%
Permeabilidade (EN ISO 11.058)	25.10 <sup>-3</sup> m/s	55 x 10 <sup>-3</sup> m/s
Tamanho da abertura (NBR 12.956)	200 µm	400 µm

Fonte: Huesker, (2018).

A coleta do resíduo da ETA 006 foi realizada na descarga do decantador I da ETA 006 (BRK AMBIENTAL/SANEATINS, PALMAS-TO-BRASIL). Um dos objetivos dessa coleta em batelada foi obter uma quantidade de massa (teor de sólidos acima de 100 g/L) e volume de resíduo denominado de “Resíduo Mãe” necessário para realizar todos os ensaios planejados de bancada em geotêxtil e ensaios na instalação piloto (ver Figura 2).



**Figura 2.** Coleta do “Resíduo Mãe”: tubulação de descarga de resíduo do Decantador I (1), detalhe do mangote na tubulação de descarga do decantador (2), enchimento do resíduo no reservatório de 2000 L (3), resíduo mãe armazenado no reservatório (4).

A coleta do resíduo do decantador da ETA 006 foi realizada de acordo com a sequência de procedimentos descritos a seguir:

- 1º: foi coletado na tubulação de descarga de resíduo do decantador I e armazenado em reservatório de 2000 L. Amostra do resíduo coletado ficou em repouso por 24 h.
- 2º: após 24 h, foi sifonado o sobrenadante e realizados os passos 1 e 2 até completar um volume de 2000 L de “Resíduo Mãe” e medido a concentração de SST que resultasse concentrações aproximadas de 100 g/L.

As análises foram realizadas com apoio do Laboratório de Saneamento do IFTO, Palmas-TO, e do Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP, em Ribeirão Preto – SP. As metodologias das análises adotadas encontram-se descritas APHA (2012), conforme detalhes na Tabela 1. Já as análises distribuição de tamanho de partículas do resíduo (NBR 7181, 1984) e análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) na USP em São Paulo - SP.

Para os ensaios do sistema de filtração de bancada em geotêxtil, foi utilizado o resíduo armazenado no reservatório de 500 L. Nessa etapa, foi retirado um volume 250 L do “Resíduo Mãe” e levado ao laboratório de Saneamento (IFTO, Palmas, Tocantins – Brasil). Posteriormente realizou a caracterização físico-química de acordo com os parâmetros listados na Tabela 1.

A partir do “Resíduo Mãe” foram preparadas três Concentrações de Resíduo de Estudo (CRE). Sendo assim, para obter as três concentrações de SST do resíduo de estudo para os ensaios de filtração de bancada e na instalação piloto, foi utilizada amostra de água filtrada da ETA 006 para preparar as concentrações planejadas, sendo: CRE 1 de 0.25 g/L, CRE 2 de 10.13 g/L e CRE 3 de 20 g/L (ver Figura 3). Nessa etapa foi realizado um planejamento experimental denominado delineamento composto face centrada (DCFC), que teve como objetivo observar a influência das variáveis estudadas (concentração inicial de SST do resíduo e a dosagem de polímero) durante o desaguamento da filtração de bancada em geotêxtil. O delineamento composto de face centrada (DCFC) foi realizado para a geração de modelos das variáveis que comprovadamente tiveram influência no desaguamento do resíduo nos ensaios de bancada em geotêxtil.



**Figura 3.** Preparo da concentração do resíduo de estudo: resíduo do decantador (1), coleta de água filtrada da ETA006 em bombonas para realizar as diluições (2), concentração de resíduo de estudo preparada (3).

Nesse planejamento, buscou-se avaliar a eficiência dos polímeros (catiônico, aniônico e não-iônico) e o tipo de gramatura mais adequada para o desaguamento do resíduo. Sendo assim, os ensaios de bancada com geotêxtil foi analisado por meio dos resultados de turbidez do filtrado e o tempo de desaguamento. A análise estatística foi realizada por meio do software online Protimiza Experimental Design (Rodrigues e Costa, 2014). As condições experimentais e seus níveis reais e codificados e os valores mínimos e máximos das variáveis são mostrados na Tabela 5, conforme Rodrigues e Lemma (2014).

O sistema de filtração de bancada em geotêxtil que foi utilizado para a execução dos ensaios foi construído de forma a permitir o desaguamento do resíduo, conforme o esquema ilustrado na Figura 4. Foram utilizados apenas materiais de fácil acesso e simples montagem para permitir o emprego da metodologia em qualquer lugar, inclusive em campo, caso necessário.

O sistema consiste em redução em PVC, de diâmetro de 75x50 mm, encaixada a um suporte de madeira, nas quais os discos de geotêxtil foram presos na parte inferior da redução com o auxílio de abraçadeira metálica. O líquido permeado foi coletado em um funil de plástico e armazenado em *beckers* de vidro, para posterior análise, posicionados na parte inferior (ver Figura 5).



**Figura 4.** Sistema de filtração de bancada em geotêxtil: redução em PVC de diâmetro de 75x50 mm, abraçadeira metálica e tecido geotêxtil (1) e kit de filtração (2 e 3).

O ensaio de bancada em geotêxtil seguiu a metodologia descrita por Miratech (2005) e Lawson (2006) denominada ensaio de teste de cone em geotêxtil. Esse 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.

O ensaio de bancada foi organizado de acordo com a sequência de procedimentos descritos a seguir:

- homogeneizar o resíduo preparado e medir 0.5 L, conforme o planejamento experimental;
- para cada amostra de concentração de resíduo de estudo, foram realizados ensaios em jarreste variando-se as dosagens dos condicionantes químicos (polímeros sintéticos aniônico, catiônico e não iônico) de 0.5, 1.5 e 2.5 mg pol./g SST, com gradiente de mistura de  $200\text{ s}^{-1}$  e tempo de mistura do polímero de 60 segundos,
- após a mistura do condicionante químico no jarreste as amostras foram filtradas em geotêxtil (ver Figura 5). No teste de bancada em geotêxtil foram realizados ensaios com duas gramaturas em tecido geotêxtil, denominado GT1 e GT2.
- durante a filtração em geotêxtil, foi registrado o volume do filtrado em função do tempo. A cada 10 s realizava uma coleta com objetivo de analisar o tempo de desaguamento. Para o encerramento do desaguamento contínuo nos ensaios de bancada, seguiu a proposta de Tominaga (2010) de 20 gotas por minuto;
- após a etapa de filtração, foi realizada a caracterização do filtrado (ver Tabela 1), sendo analisados os seguintes parâmetros: volume do filtrado e os valores de turbidez da amostra composta.



**Figura 5.** Ensaio de bancada em geotêxtil: adição de polímero na mistura rápida (1), sistema de bancada de filtração em geotêxtil (2) e desaguamento do resíduo (3).



## Resultados e discussões

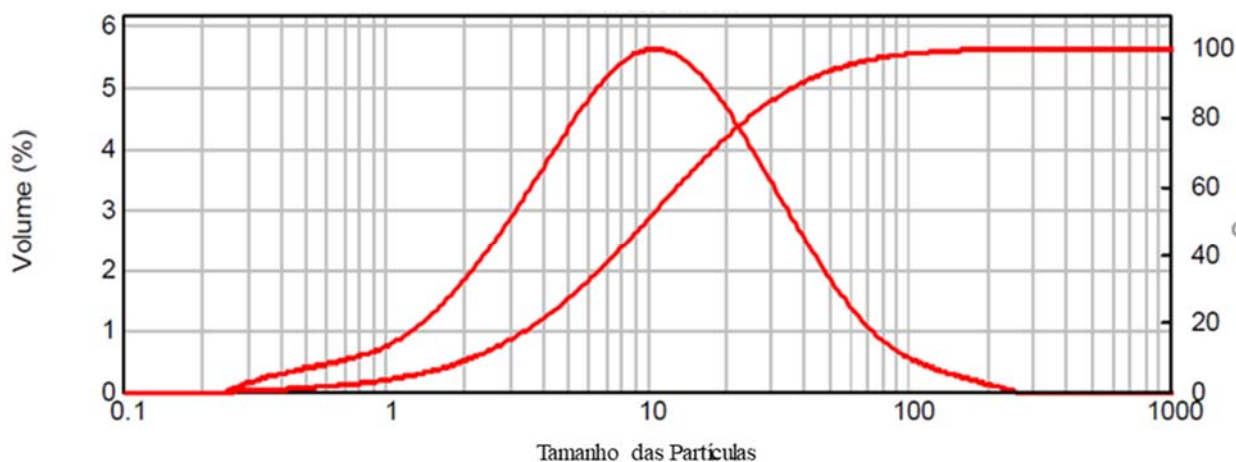
A Tabela 4 mostra os resultados dos parâmetros físico-químico analisados para caracterizar o “Resíduo Mãe” e as três concentrações das amostras preparadas de resíduo de estudo (CRE 1, 2 e 3) utilizada nos ensaios de bancada. Os resultados mostram que os parâmetros de pH, alcalinidade, COT, COD, manganês e turbidez aumentaram de acordo com incremento da concentração de SST nos resíduos preparados.

**Tabela 4.** Resultados da Caracterização físico-química dos resíduos de estudo.

Parâmetro	Resíduo Mãe	CRE 1 (20 g/L)	CRE 2 (10.13 g/L)	CRE 3 (0.25 g/L)
Alcalinidade (mg/L)	121.12	46.12	45.90	46.97
Manganês (mg/L)	17.30	5.01	1.99	<0.010
pH	6.89	6.23	6.47	6.24
SST (g/L)	122.71	20.5	9.9	0.24
STD (g/L)	0.268	0.169	0.121	178
ST (g/L)	122.97	23.11	9.64	0.41
COT (mg/L)	5.761	5.841	3.968	4.068
COD (mg/L)	3.303	3.780	3.864	3.568
Turbidez	118.200	32.550	14.350	305

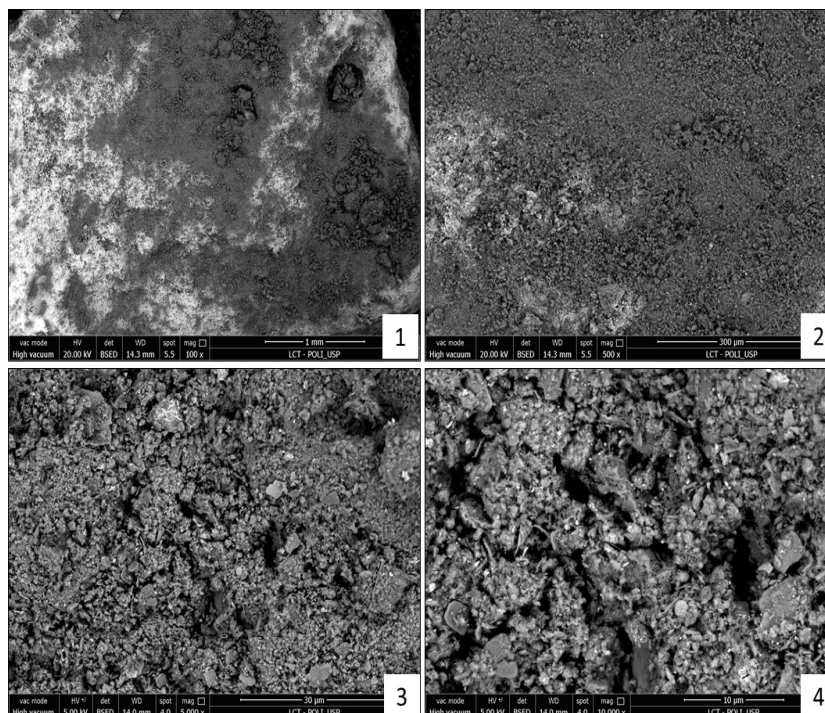
Fonte: Autor (2018).

A Figura 6 mostra a curva granulométrica do “Resíduo Mãe” coletado no decantador da ETA 006. Os resultados evidenciam que o resíduo 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  $\mu\text{m}$ ).



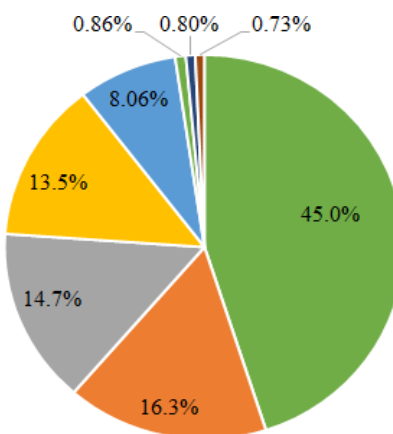
**Figura 6.** Curva granulométrica do “Resíduo Mãe” coletado no decantador da ETA 006 no período de 10 a 13 de abril de 2018.

Para as amostras do “Resíduo Mãe”, os resultados da micrografia (MEV) e análise qualitativa dos componentes das partículas (método EDS) são apresentados, respectivamente, nas Figuras 7 e 8.



(1) aumento de 100x; (2) aumento de 500x; (3) aumento de 5.000x; (4) aumento de 10.000x

**Figura 7.** Morfologia das partículas obtidas por imagem de MEV do “Resíduo Mãe” coletado no decantador da ETA 006 no período de 10 a 13 de abril de 2018.



■ Compostos Oxigenados ■ Alumínio ■ Silica ■ Carbono ■ Ferro ■ Potássio ■ Magnésio ■ Titânio

**Figura 8.** Análise qualitativa dos elementos químicos constituintes na parte sólida do “Resíduo Mãe”, usando o método EDS da microscopia eletrônica.

Observa-se na Figura 7 que a morfologia do “Resíduo Mãe” apresentou superfície com aspecto irregular e composição heterogênea de partículas, indicando elevada quantidade de partículas com diâmetros com cerca de 10 a 30  $\mu\text{m}$ . A análise qualitativa dos elementos constituintes, obtidas pelo método EDS, do “Resíduo Mãe” é apresentada na Figura 8.

A Figura 8 mostra o predomínio dos elementos químicos carbono, oxigênio, magnésio, alumínio, sílica, potássio, titânio e ferro no “Resíduo Mãe. A presença de oxigênio de 45% informada na análise qualitativa dos compostos de partículas (EDS) se deve aos compostos oxigenados formados com os elementos químicos Alumínio (Al), Silício (Si), Carbono (C) e ferro (Fe). Como exemplos de compostos oxigenados pode-se esperar a presença de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) que pode estar associado à presença de areia na água bruta (encontrados em minerais, areias e silicatos), o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) também conhecida como alumina que pode estar relacionada ao uso de coagulante do tipo sulfato de alumínio no processo de tratamento. Justificativa similar ao óxido de alumínio pode também ser atribuída ao óxido de ferro  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

A composição predominante de alumínio 16.3% no resíduo em estudo, está de acordo com o reportado por Dias *et al.* (2002) e Barroso (2007), que citam predominância de argilominerais tais como a caulinita e gibsita (compostos de Al) e quartzo (compostos com Si) no resíduo de ETA que emprega sulfato de alumínio como coagulante.

O delineamento composto de face centrada (DCFC) foi realizado para a otimização do desaguamento do resíduo da ETA 006 nos ensaios de bancada com geotêxtil, considerando as seguintes variáveis:  $X_1$  (concentração inicial de SST no resíduo) e  $X_2$  (dosagem de polímero). A partir dos resultados apresentados na Tabela 5, calcularam-se os coeficientes de regressão e construíram-se modelos matemáticos para as respostas: turbidez do filtrado e tempo de desaguamento. Nessa etapa foi utilizado ANOVA para avaliar a adequação dos modelo (ver Tabela 6).

Considerando somente os parâmetros com significância estatística a 90% de confiança ( $p$ -valor  $\leq 0.10$ ), foram elaborados os modelos matemáticos que expressam a correlação entre as variáveis dependentes ( $X_1$  e  $X_2$ ) com as respostas avaliadas (turbidez do filtrado e tempo de desaguamento) dos polímeros catiônico, aniônico e não-iônico, conforme Tabela 6.

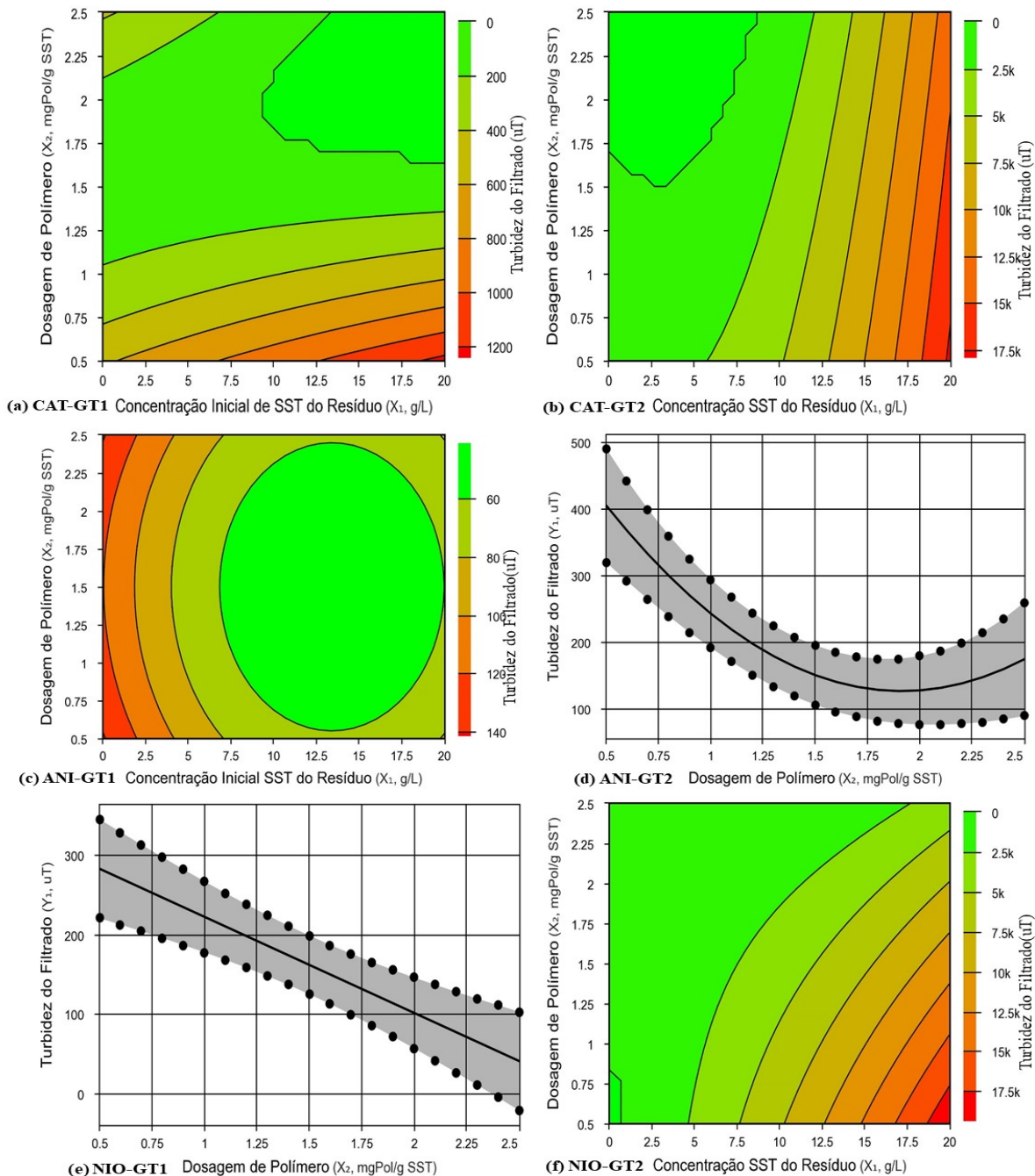
A partir da Tabela 5 e 6 os resultados obtidos evidenciam que o Polímero catiônico e o GT1 foram os mais indicados para o desaguamento do resíduo da ETA 006, uma vez que apresentaram tempo de desaguamento adequado e reduzida turbidez do filtrado. Considerando a variabilidade inerente do resíduo, pode-se concluir que o modelo se ajustou bem aos dados experimentais, sendo possível construir a curva de contorno, conforme Figuras 9 e 10.

**Tabela 5.** Matriz do delineamento composto de face centrada com variáveis independentes (concentração de SST no resíduo e dosagem de polímero) em valores codificados e valores reais (entre parênteses) e respostas observadas para o GT1 e GT2 (turbidez do filtrado e tempo de desaguamento) utilizando polímero catiônico, aniônico e não-iônico.

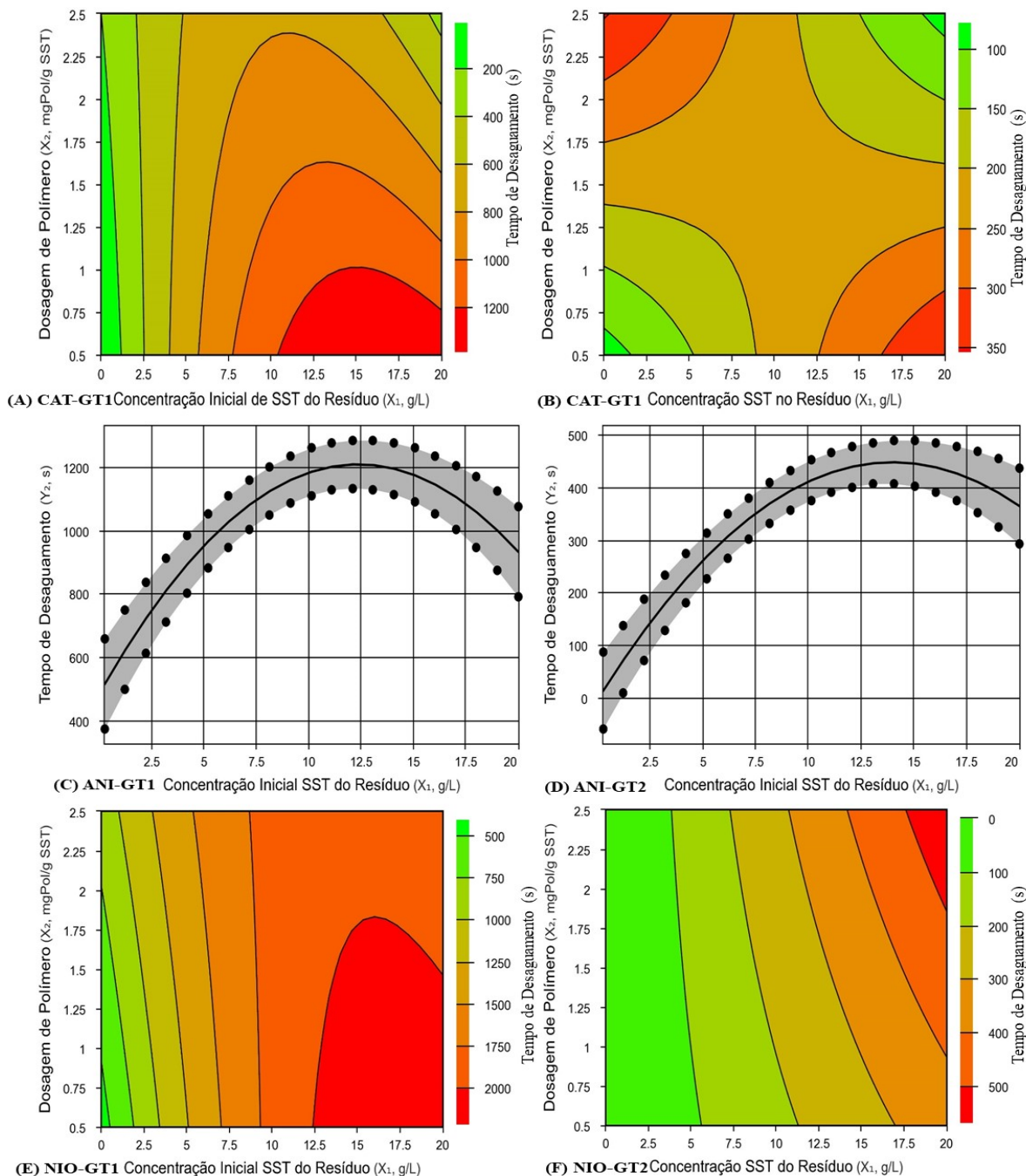
Ensaio	Variáveis		CATIÔNICO				ANIÔNICO				NÃO-IÔNICO			
	Concentração de SST no resíduo	Dosagem de polímero	GT1		GT2		GT1		GT2		GT1		GT2	
			Turbidez do filtrado (uT)	Tempo (s)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo (s)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo (s)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo (s)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo (s)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo (s)
1	-1(0.25)	-1(0.50)	403	10	556	10	161	419	371	10	275	331	493	8
2	1(20)	-1(0.50)	1.618	1411	20.150	302	92.9	1189	302	441	577	2.041	19.780	359
3	-1(0.25)	1(2.50)	174	190	310	257	131	499	267	17	113	722	291	11
4	1(20)	1(2.50)	57,5	421	14.500	12	80.8	949	113	382	49.60	1556	2.320	589
5	-1(0.25)	0(1.5)	205	217	104	462	103	625	304	14	124	970	283	9
6	1(20)	0(1.5)	46.3	667	13.000	10	49.20	657	142	269	101	2.380	12.480	462
7	0(10.13)	-1(0.50)	718	1093	6.750	96	37.4	1341	539	238	134	1.966	5.120	175
8	0(10.13)	1(2.50)	27.60	670	350.5	343	70.80	1183	141	470	98.60	1.765	1.594	251
9	0(10.13)	0(1.5)	50.40	1040	2.620	319	55.9	1174	157	408	81.50	1.882	4.060	196
10	0(10.13)	0(1.5)	52.90	1042	2.500	217	54.4	1215	87.3	453	102	1.660	4.360	270
11	0(10.13)	0(1.5)	54.60	1048	2.100	351	51.9	1010	57.6	495	119	1.854	3.960	211

**Tabela 6.** Porcentagem de variância explicada ( $R^2$ ), valor F calculado ( $F_{calc.}$ ) e F tabulado ( $F_{tab.}$ ) para as respostas de turbidez do filtrado e tempo de desaguamento, por análise de variância (ANOVA).

Respostas		Turbidez do Filtrado		$F_{Calc.}$	$F_{Tab.}$	$R^2$ (%)
Modelos ajustados						
Catiônico	GT1	$82.84 - 413.32 x_2 + 416.84 x_2^2 - 332.87 x_1 x_2$		11.8	3.07	83.5
	GT2	$2864.10 + 7780 x_1 + 5239.23 x_1^2 - 2049.25 x_2$		42.3	3.07	94.78
Aniônico	GT1	$45.58 - 28.68 x_1 + 43.24 x_1^2 + 21.24 x_2^2$		13.84	3.07	85.58
	GT2	$149.58 - 115.17 x_2 + 139.25 x_2^2$		6.66	3.11	62.50
Não iônico	GT1	$161.34 - 120.80 x_2$		5.86	3.36	39.45
	GT2	$3818.80 + 5585.50 x_1 + 2122.37 x_1^2 - 3531.33 x_2 - 4314.50 x_1 x_2$		45.20	3.18	96.79
Respostas		Tempo de Desaguamento		$F_{Calc.}$	$F_{Tab.}$	$R^2$ (%)
Modelos ajustados						
Catiônico	GT1	$978.60 + 347 x_1 - 492.60 x_1^2 - 205.50 x_2 - 292.50 x_1 x_2$		96.02	36.20	3.18
	GT2	$216.27 - 134.25 x_1 x_2$		28.22	3.36	3.5
Aniônico	GT1	$1184.60 + 208.67 x_1 - 461.60 x_1^2$		79.33	15.84	3.11
	GT2	$412.80 + 175.17 x_1 - 223.97 x_1^2$		84.80	22.3	3.11
Não iônico	GT1	$1825.40 + 659 x_1 - 492.07 x_1^2 - 219 x_1 x_2$		89.32	19.50	3.07
	GT2	$231 + 230.33 x_1 + 51.50 x_2 + 56.75 x_1 x_2$		98.61	165.7	3.07



**Figura 9.** Curva de contorno da Turbidez do Filtrado: (A) CAT-GT1 - polímero catiônico GT1, (B) CAT-GT2 - polímero catiônico GT2, (C) ANI-GT1 - polímero aniônico GT1, (D) ANI-GT2 - polímero aniônico GT2, (E) NIO-GT1 - polímero não-iônico GT1, (F) NIO-GT2 - polímero não-iônico GT2.



**Figura 10.** Curva de contorno do Tempo de Desagregação: (A) CAT-GT1 - polímero catiônico GT1, (B) CAT-GT2 - polímero catiônico GT2, (C) ANI-GT1 - polímero aniônico GT1, (D) ANI-GT2 - polímero aniônico GT2, (E) NIO-GT1 - polímero não-iônico GT1, (F) NIO-GT2 - polímero não-iônico GT2.

Por meio da curva de contorno obtida para Turbidez do Filtrado em função da concentração inicial de SST do resíduo e dosagem de polímero catiônico, a Figura 9 A (CAT-GT1) mostra uma região que evidencia a remoção de turbidez, promovida com a combinação de polímero catiônico acima de 1.60 mgPol/gSST e resíduo com concentração inicial de SST de 10 g/L. Nesses ensaios, o sistema de filtração apresentou turbidez do filtrado com valores mínimos variando de 27.6 a 54.6 uT. Satyamurthy e Bhatia (2009) relatam a necessidade de utilizar dosagem adequada de Polímero. Sem o seu uso, o geotêxtil pode não conseguir reter as partículas finas, principalmente em materiais argilosos com baixas concentrações de sólidos, permitindo melhorar a qualidade do efluente desde o início do processo. Entretanto, foram observados na Figura 9 A (CAT-GT1) picos de turbidez do filtrado (174 uT a 1.618 uT) condicionados com os ensaios realizados com resíduo com concentração de SST de 0.25 g/L (Ensaio 1, 3 e 5) e dosagem não adequada de polímero (Ensaio 2 e 7).

Avaliando-se a Figura 9 B (CAT-GT2), as curvas de contorno indicam uma tendência de remoção de turbidez com a combinação de polímero catiônico acima 1.50 mgPol/gSST e resíduo com concentração de SST abaixo de 8.50 g/L, obtendo turbidez mínima do filtrado de 104 a 556 uT para os Ensaio 1, 3 e 5. Observa-se que, nos Ensaio 2 e 7, a dosagem mínima de polímero não favoreceu a remoção de turbidez no sistema de filtração, obtendo 20.150 uT e 6.750 uT, respectivamente. Os resultados mostram que o tamanho da abertura dos poros do GT2 (400  $\mu$ m) permitiu a passagem das partículas sólidas no sistema de filtração de bancada em geotêxtil. Koerner e Koerner (2006) relatam que o tamanho da abertura dos poros do geotêxtil é uma característica importante no desaguamento. Com isso, o GT1 apresentou um desempenho melhor na turbidez do filtrado comparado com o GT2, devido ao tamanho da abertura de 200  $\mu$ m e à dosagem adequada de polímero.

A Figura 9 C (ANI-GT1) mostra a ação do Polímero Aniônico na remoção da Turbidez do Filtrado, obtendo valores mínimos de 37.4 uT e valores máximos de 131 uT. Nos ensaios, com a combinação de dosagem de polímero aniônico mínima de 0.55 mgPol/gSST e resíduo com concentração de SST de 10 g/L, os resultados apresentados da curva de contorno (Figura 9 c) mostram uma região que reúne condições favoráveis para remoção de turbidez do filtrado, apresentando valores abaixo de 54 uT. Já na Figura 9 D (ANI-GT2), os resultados evidenciam que a redução de turbidez do filtrado está condicionada à aplicação de dosagem adequada de polímero. Os valores obtidos de turbidez no sistema de bancada apresentaram mínimo de 57.6 uT (Ensaio 11) e valores máximos de 539 uT (Ensaio 7).

Nos ensaios realizados com o Polímero Não Iônico (Figuras 9 E e F), os resultados encontrados para o GT1 indicaram que o aumento da dosagem de Polímero favoreceu a remoção de turbidez, porém o sistema apresentou Turbidez do Filtrado variando de 81.50 a 577. Para os ensaios realizados com o GT2, as curvas de contorno mostram uma tendência de remoção de turbidez

com resíduo abaixo de 5 g/L. Porém, os resultados com o Polímero Não Iônico, utilizando o GT2, apresentaram desempenho insatisfatório na remoção da turbidez comparados com os resultados de outros ensaios. Dessa forma, foram obtidos valores de turbidez mínima de 283 uT e máxima de 19.780 uT.

Resultados semelhantes foram encontrados por Guanaes (2009), que analisou o desaguamento do resíduo de estação de tratamento de água. Os resultados obtidos no teste em bancada indicaram que o polímero catiônico apresentou menor turbidez do filtrado e maior desaguamento em relação aos polímeros estudados.

Com relação à análise da curva de contorno do Tempo de Desaguamento (s), os resultados da variação da concentração inicial do SST do resíduo ensaiado de 0.25 g/L para 20 g/L revelaram um incremento do tempo de desaguamento do resíduo com teor de SST acima de 10 g/L (ver Figura 10 A). O decréscimo acentuado do tempo em relação à concentração de resíduo se justifica devido à formação do *filter cake*, que diminui a permeabilidade do tecido do geotêxtil. Observa-se, na Figura 10 A, que o Tempo de Desaguamento variou de 10 a 1.093 s, comportamento este condicionado em função da concentração inicial de SST do resíduo e Dosagem de Polímero. Já na Figura 10 B observa-se que o tempo de desaguamento foi superior comparado com os resultados da Figura 10 A. Os resultados mostram que o tamanho da abertura dos poros do GT2 (400  $\mu$ m) permitiu a passagem rápida (10 a 462 s) do resíduo no sistema de filtração, o que acarretou uma ineficiência na remoção da turbidez nos ensaios.

As Figuras 10 C e D mostram que, nos ensaios realizados com o Polímero Aniônico, os resultados com o GT1 e o GT2 apresentaram o mesmo comportamento com o tempo de desaguamento; ou seja, o tempo de desaguamento foi definido pela dosagem de polímero. Contudo, foi observada a influência da abertura dos poros dos geotêxteis estudados, sendo que o GT1 apresentou tempo de desaguamento superior comparado ao GT2. Nessa condição, o GT1 apresentou tempo de desaguamento variando de 419 a 1.341 s, e o GT2 apresentou um intervalo menor nos ensaios, variando de 10 a 470 s.

Os resultados obtidos na curva de contorno com o Polímero Não Iônico (ver Figura 10 E) evidenciam que o tempo de desaguamento apresentou uma tendência de aumento à medida que o teor de SST do resíduo passou de 0.25 para 20 g/L com o GT1. Na Figura 10 F, observa-se que a abertura dos poros do GT2 favoreceu um menor tempo de desaguamento de resíduos com teor de SST abaixo de 6 g/L e, conseqüentemente, a formação do *filter cake* foi prejudicada, produzindo um efluente com Turbidez do Filtrado acima de 283 uT.

Para validar a eficácia do sistema de desaguamento de resíduo, o processo precisa atender a alguns princípios de funcionamento, quais sejam: fluxo adequado do líquido, retenção das partículas e capacidade de filtração ao longo do tempo.



Assim, com base nos resultados apresentados e analisados por meio da análise estatística, o desempenho do Polímero Catiônico e o GT1 foram os mais indicados para o desaguamento dos resíduos em estudo, pois apresentaram tempo de desaguamento adequado e reduzida turbidez do filtrado. Apesar do Polímero Aniônico obter reduzidos valores de turbidez, o tempo de desaguamento foi o critério de escolha do Polímero Catiônico. Com relação à abertura dos poros do GT1 e GT2, observa-se que o GT1 apresentou melhores resultados da turbidez do filtrado e tempo de desaguamento.

Uma outra variável relevante nos ensaios de bancada foi a dosagem adequada de polímero associado com resíduos com concentração de SST acima de 10 g/L.

### Conclusões

Pode-se concluir que a concentração SST inicial do resíduo e a dosagem de condicionante químico, nesse caso o polímero catiônico, exercem influência na quantidade de material retido pelo tecido geotêxtil e no tempo de desaguamento. Observou-se ainda que as faixas estudadas de concentração SST no resíduo e dosagem de condicionante químico foram bastante eficazes; Os resultados do planejamento experimental mostraram que nos ensaios de bancada o GT1 com abertura da trama de 200 µm teve melhor desempenho na remoção da Turbidez do Filtrado e tempo de desaguamento comparados com os resultados obtidos com abertura da trama de 400 µm do GT2. Essa diferença da abertura da trama dos geotêxteis, eleva a permeabilidade do tecido e conseqüentemente acarreta o aumento da turbidez do filtrado.

O polímero catiônico apresentou desempenho satisfatório quando utilizado com GT1 e revelou aplicabilidade como condicionante químico em sistemas de desaguamento de resíduos de ETA; Quanto ao condicionamento químico dos resíduos estudados, observou-se nesta pesquisa a importância de realizar ensaios para a determinação da dosagem do polímero, já que uma dosagem excessiva ou insuficiente pode prejudicar o desempenho do sistema de desaguamento em geotêxtil.

### Referências bibliográficas

- APHA, American Public Health Association (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22th edition. Washington, USA.
- Avancini, L. L. S. (2017) *Análise do desaguamento do lodo de estações de tratamento de água em sistemas de confinamento em geotêxtil*. Dissertação de mestrado, Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Área de Infraestrutura Aeroportuária, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. 135 pp.
- Andreolli, C. V. (2001) Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB). Resíduos Sólidos do Saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: Rima, ABES. 282 pp.
- ASCE - AWWA, American Society of Civil Engineers- American Water Works Association (1996) *Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residual*. New York. 294 pp.

- Di Bernardo, L., Dantas, A. D. B., Voltan, P.E.N. (2017) *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 3ªed. São Carlos: Rima, 1246 pp.
- Fowler, J., Duke, M.L., Schmidt, M.L., Crabtree, B., Bagby, R.M., Trainer, E. (2002) *Dewatering sewage sludge and hazardous sludge with geotextile tubes*. Seventh International Conference on Geosynthetics, 22-27 September 2002, Nice, French Riviera.
- Guanaes, E. A. (2009) *Análise do Desaguamento do Lodo Residual de Estação de Tratamento de Água por Meio de Geossintéticos*. 129p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, CEFET, Minas Gerais, Brasil.
- Guimarães, M. G. A., Urashima D. C., Vidal D. M. (2014) Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems. *Geosynthetics International* 5 (21), 310-320. doi: <https://doi.org/10.1680/gein.14.00018>
- Koerner, G. R., Koerner, M. R. (2006). *Geotextile tube assessment using a hanging bag test*. *Geotextiles and Geomembranes*. v. 24, n. 2, p. 129-37.
- Lawson, C. R. (2006) Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS*, 8, Yokohama. Proceedings... Rotterdam: Millpress.
- Lawson C. R. (2008) Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynthetics International* 6 (15) 384-427. doi: <https://doi.org/10.1680/gein.2008.15.6.384>
- Miratech, T. C. N. (2005) *Geotube*. Dewatering Technology: versão 5.2. Seção: Aplicações: [S.l.]: Mining & Mineral Processing.
- Moo-Young, H. K., Gaffney, D. A., MO, X. (2002). Testing Procedures to asses the viability of dewatering with geotextiles tubes. *Geotextiles and Geomembranes* 5(20) 289-303. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(02\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(02)00028-6)
- Moo-Young, H. K., Tucker W. (2002) Evaluation of vacuum filtration testing for geotextile tubes. *Geotextiles and Geomembranes* 3(20) 191-212. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(02\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(02)00008-0)
- Muthukumar, A. E., Ilamparuthi, K. (2006) Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, FL, 210-219.
- Reali, M. A. P (1999) Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos e Estações de Tratamento de Água*. Rio de Janeiro: Rima, ABES. 240 pp.
- Rodrigues, M. I., Costa, P (2014) *Protimiza Experimental Design (software)*. Acesso em 10 de abril de 2018, disponível em: <http://experimental-design.protimiza.com.br>
- Rodrigues, M. I., Lemma, A. F. (2014) *Experimental Design and Process Optimization*, CRC Press, New York.
- Satyamurthy, R., Bhatia, S. K. (2009) Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles. *Geosynthetics International* 2(16) 83-96. doi: <https://doi.org/doi.org/10.1680/gein.2009.16.2.83>
- Tominaga, E. (2010) *Análise dos Procedimentos para Avaliação de Desempenho de Sistemas fechados com Geotêxtil para Desaguamento*. Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, 126 pp.