

# Influência das características dos resíduos gerados no tratamento de água na eficiência do desaguamento em tubo geotêxtil

*Influences of drinking water sludge characteristics in the efficiency of dewatering in geotextile tube*

• **Data de entrada:**  
06/05/2019

• **Data de aprovação:**  
17/12/2019


Sérgio Carlos Bernardo Queiroz<sup>1\*</sup> | Angela Di Bernardo Dantas<sup>2</sup> | Giuliano Guimarães Silva<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.032>

## ORCID ID

Queiroz SCB  <https://orcid.org/0000-0003-1972-6103>

Dantas ADB  <https://orcid.org/0000-0003-3144-3130>

Silva GG  <https://orcid.org/0000-0002-9606-3959>

## Resumo

Dentre as tecnologias disponíveis para realizar o desaguamento dos resíduos gerados no tratamento de água (RETA), a filtração em tubo geotêxtil se tornou uma opção bastante viável, sendo usada em diversas ETAs no Brasil. Entretanto, algumas dúvidas sobre certos fatores dessa tecnologia não foram totalmente abordadas na literatura, como o efeito de mudanças nas características dos RETAs no desempenho da filtração em tubo geotêxtil. Assim, o presente trabalho, por meio de ensaios de bancada em filtro pressurizado de geotêxtil, buscou responder a tais questionamentos. Os ensaios de desaguamento foram realizados com dois tipos de RETAs gerados em escala piloto a partir de fontes de água bruta com características distintas: o RETA tipo I, preparado com suspensão da argila caulinita, e o RETA tipo II, de manancial superficial com turbidez elevada. Os resultados dos ensaios de desaguamento mostraram que o tipo da água bruta teve efeito direto na eficiência de desaguamento do resíduo no tubo geotêxtil, tendo o RETA tipo II resultando em teor de sólidos após desaguamento de 15%, e o RETA tipo I (com características inorgânicas) alcançado teor de sólidos mais elevado, cerca de 37%. A capacidade de retenção de sólidos pelo tubo geotêxtil foi influenciada pela concentração inicial de SST do resíduo, onde com baixa concentração (<10 g/L de SST) se obteve turbidez no efluente filtrado superior a 100 uT, e, de maneira oposta, com concentração mais elevada (20 g/L de SST), a turbidez esteve próxima de 5 uT.

**Palavras-chave:** Resíduos de ETA. Desaguamento. Tubo geotêxtil.

## Abstract

*Among the technologies available to perform the dewatering of drinking water sludge (DWS), geotextile tube filtration became a viable option, being used in several water treatment plant (WTP) in Brazil. However, some doubts about certain factors of this technology were not fully addressed in the literature, such as the effect that changes in the characteristics of DWS have on the performance of geotextile tube filtration. Thus the present work, through tests of bench in pressurized filter of geotextile, sought to answer such questions. The dewatering tests were performed with two types of DWS generated on a pilot scale from raw water sources with different*

<sup>1</sup> Universidade do Tocantins (UFT) - Palmas - Tocantins - Brasil.

<sup>2</sup> Universidade de Ribeirão Preto (Unaerp) - Ribeirão Preto - São Paulo - Brasil.

<sup>3</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO) - Palmas - Tocantins - Brasil.

\* **Autor correspondente:** [sergiocbq@gmail.com](mailto:sergiocbq@gmail.com).

*characteristics: DWS type I, prepared with suspension of kaolinite clay and DWS type II, with a high turbidity surface. The results of the dewatering tests showed that the crude water type had a direct effect on the dewatering efficiency of the residue in the geotextile, with DWS type II resulting in a solids content after dewatering of 15% and DWS type I (with inorganic characteristics) achieved higher solids content, about 37%. The solids retention capacity of the geotextile was influenced by the initial concentration of TSS of the residue, where at a low concentration (<10 g/L of TSS), turbidity was obtained in the filtered effluent higher than 100 uT. concentration (20 g/L TSS) the turbidity was close to 5 uT.*

**Keywords:** *Drinking water sludge. Dewatering. Geotextile tube.*

## 1 INTRODUÇÃO

O aprimoramento no tratamento de água potável tornou-se uma necessidade crescente na sociedade moderna. No Brasil, a maioria das estações de tratamento de água (ETAs) que tratam água captada em mananciais superficiais emprega a tecnologia de tratamento por ciclo completo. Essa técnica de tratamento utiliza processos e operações unitárias (coagulação, floculação, decantação/flotação, filtração e desinfecção), visando à remoção de partículas suspensas, em estado coloidal, compostos químicos e microrganismos presentes na água bruta. Assim, como resultado do processamento da água bruta pelas unidades da ETA, além da obtenção de água potável, tem-se a geração dos resíduos do tratamento de água (RETAs) (Silveira, 2012).

A maior parte dos RETAs são provenientes das limpezas ou descargas dos decantadores (ou eventualmente, em flotadores) e da água de lavagem dos filtros (ALF). A água de lavagem dos filtros produz a maior quantidade de resíduos em termos volumétricos; já a descarga de decantador produz a maior quantidade em termos mássicos. A quantidade e a qualidade dos RETAs dependem de diversos fatores, merecendo destaque principalmente a qualidade da água bruta, a tecnologia de tratamento de água, as dosagens de produtos químicos empregados e as condições de operação e manutenção do sistema. Em função de todos esses fatores, podem ser gera-

dos resíduos com características diversas, o que dificulta muito a definição do melhor sistema de tratamento para os RETAs, pois tais características interferem nos processos de adensamento, desaguamento e secagem do resíduo (Di Bernardo et al., 2012).

O gerenciamento dos RETAs, tanto do ponto de vista qualitativo como quantitativo, representa um sério problema para os responsáveis da área de saneamento, pois o lançamento desses resíduos em corpos d'água é considerado crime ambiental quando não aprovado por órgãos ambientais, de acordo com o artigo 54 da Lei 9.605/98. Os efeitos sobre o meio ambiente decorrentes do lançamento dos RETAs nos corpos d'água são severos, podendo ocorrer alterações nas características físicas, químicas e biológicas da água, principalmente devido à sobrecarga de ferro e alumínio, presentes em quantidade marcante nos resíduos (Guimarães, 2007).

Tanto no Brasil como em outros países, o tratamento dos RETAs envolve técnicas convencionais de separação sólido-líquido, geralmente com uma etapa inicial de clarificação/adensamento, e logo após uma etapa de desaguamento/secagem. Essa última etapa pode ser realizada por métodos mecanizados (como centrifuga, filtro prensa e prensa desaguadora) e métodos não mecanizados (como leito de secagem, leito de drenagem, lagoa de sedimentação e filtração em tubo geotêxtil) (Di Bernardo et al., 2012).

O desaguamento de materiais com alto teor de umidade pela filtração em tubos geotêxteis vem sendo muito utilizado nas últimas décadas, sendo uma tecnologia eficiente para a redução do impacto ambiental destes resíduos (Lawson, 2008). A técnica consiste em eliminar o excesso de água do resíduo, por meio da drenagem do líquido pelos pequenos poros do geotêxtil, ocorrendo desaguamento progressivo e redução do volume original. Utiliza-se a filtração em geotêxtil desde a década de 1980, geralmente em material dragado de rios e represas, sendo que nos últimos anos, com o avanço da tecnologia, permitiu-se a melhoria e diversificação da aplicação dessa tecnologia (Morgan, 2014).

Segundo Koerner e Koerner (2006), o processo de desaguamento dos resíduos em tubos geotêxteis envolve três fases: enchimento, desaguamento e consolidação. Durante a fase de enchimento, o resíduo é bombeado para o tubo, sendo que o tempo de bombeamento varia em cada projeto e situação específica. Durante o bombeamento já ocorre a etapa de desaguamento. A água livre drena através dos poros do geotêxtil, resultando em uma grande redução no volume. Os ciclos de enchimento e desaguamento antes que o processo entre na fase final de consolidação dependem da quantidade de sólidos no resíduo e da capacidade de armazenamento do tubo geotêxtil. Durante a fase de consolidação, a água dos poros dentro do material contido se dissipa lentamente e o conteúdo do tubo se consolida em uma forma adequada para descarte ou transporte. A consolidação requer geralmente de 2 a 4 meses, dependendo do material a ser desaguado e do teor de sólidos final desejado (Liao e Bhatia, 2006).

Entre as vantagens desse método, quando comparado a outras tecnologias de desaguamento, destacam-se o baixo custo de energia, fácil operação e alta eficiência (Bhatia et al., 2013). Para Lawson (2008), os tubos geotêxteis são simples

de utilizar, ao contrário de outras tecnologias de desaguamento mecânicas mais complexas. Entretanto, em função do número de variáveis envolvidas no processo de filtração em tubo geotêxtil, existem ainda incertezas sobre a melhor condição do desaguamento em alguns tipos de resíduos, entre eles os RETAs.

Apesar de várias experiências práticas em ETAs no Brasil mostrarem o potencial do uso dos tubos geotêxteis no desaguamento de RETAs, dúvidas sobre a influência de certos fatores não foram totalmente abordadas na literatura. Entre tais fatores podem-se citar dois de extrema relevância: a) qual a importância da origem da água bruta nas características de desaguamento dos RETAs pela filtração em tubo geotêxtil; b) qual a concentração mínima de SST que os resíduos devem possuir para que a eficiência do desaguamento não fique comprometida.

Tendo em vista os poucos estudos realizados sobre a filtração em tubo geotêxtil no desaguamento de resíduos de ETA, o presente trabalho teve como objetivo principal investigar qual o impacto que a variação nas características dos RETAs proporciona no desaguamento desses resíduos quando utilizada a filtração em tubo geotêxtil.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Resíduos de ETA utilizados na pesquisa

Foram usados na pesquisa dois tipos de RETA (tipo I e tipo II) provenientes de águas brutas com características distintas. O RETA tipo I foi obtido por meio de água bruta sintética, utilizando uma suspensão da argila caulinita. A caulinita foi escolhida para preparação da água bruta, pois é uma das principais argilas presentes em águas superficiais, representando assim características comuns em diversos tipos de mananciais utilizados no abas-

tecimento público. Os procedimentos para obter a água bruta com suspensão de caulinita seguiu o adotado por Dantas (2004). O RETA tipo II originou-se de um manancial de água corrente, com altos valores de turbidez no período chuvoso, outra característica comum na maior parte das ETAs no Brasil. A partir dos dois tipos de água bruta, foram produzidos os RETAs em uma instalação piloto de geração de resíduos (IPGR) que simulou as condições operacionais existentes em uma ETA de ciclo completo. O procedimento de geração dos resíduos foi adaptado dos trabalhos realizados por Verrelli (2008) e Silva (2017).

A IPGR (ver Fig. 1) foi concebida para operar em batelada. Na mesma unidade, ocorriam as etapas de mistura rápida, floculação e decantação. O dimensionamento da IPGR seguiu os critérios de projeto para unidades mecanizadas de mistura rápida e floculação recomendadas por Di Bernardo e Dantas (2005). O tanque era provido com um agitador tipo turbina, com inversor de

frequência para promover alterações no gradiente de velocidade. Seguem os critérios do dimensionamento da IPGR: tempo de mistura rápida de 30 segundos; gradiente de mistura rápida de  $200 \text{ s}^{-1}$ ; tempo de floculação de 25 minutos; gradiente de floculação: máximo de  $60 \text{ s}^{-1}$  e mínimo de  $25 \text{ s}^{-1}$ ; velocidade de sedimentação de  $1,5 \text{ cm/min}$ . Antes de iniciar a geração dos resíduos na instalação piloto, foram realizados, para cada água de estudo, ensaios de bancada utilizando equipamento jarteste (Nova Ética - modelo LDB 6). Os ensaios de jarteste visaram à obtenção do diagrama de coagulação, e conseqüentemente os valores otimizados da dosagem do coagulante e pH de coagulação, para serem aplicadas na IPGR. O coagulante utilizado foi o sulfato de alumínio líquido comercial com 7,4 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Após a obtenção do diagrama de coagulação foram realizados os ensaios de geração dos RETAs, onde seguiu-se o seguinte roteiro descrito na tabela 1:

**Tabela 1** - Roteiro de realização dos ensaios na IPGR.

Etapa	Parâmetros
1 - Enchimento da IPGR com água bruta	1.300 litros
2 - Ligado o agitador mecânico da IPGR e ajustada a rotação do inversor de frequência	Gradiente de velocidade de $100 \text{ s}^{-1}$
3 - Adicionou-se o alcalinizante (cal hidratada) na IPGR	Tempo de mistura de 20 segundos
4 - Ajustou-se o gradiente de velocidade para a mistura rápida	Gradiente de velocidade de $200 \text{ s}^{-1}$
5 - Foi adicionado o sulfato de alumínio na IPGR	Tempo de mistura de 30 segundos
6 - Decorrido o tempo de mistura rápida, foram ajustadas as condições de floculação	Gradiente de velocidade de $40 \text{ s}^{-1}$ e tempo de contato de 25 minutos
7 - Após a floculação, desligou-se o agitador da IPGR, e foi aguardado o tempo de sedimentação	Velocidade de sedimentação de $1,5 \text{ cm/min}$ . Tempo total na IPGR de 52 minutos

Após o término da sedimentação, o sobrenadante (água decantada) era retirado por sifonamento com auxílio de uma mangueira. Parte da água decantada era armazenada para uso posterior na preparação/diluição dos resíduos de

estudo. Os resíduos sedimentados no fundo da unidade eram retirados por meio de um registro e transferidos para um reservatório de armazenamento. A Fig. 2 apresenta algumas etapas dos ensaios na IPGR.

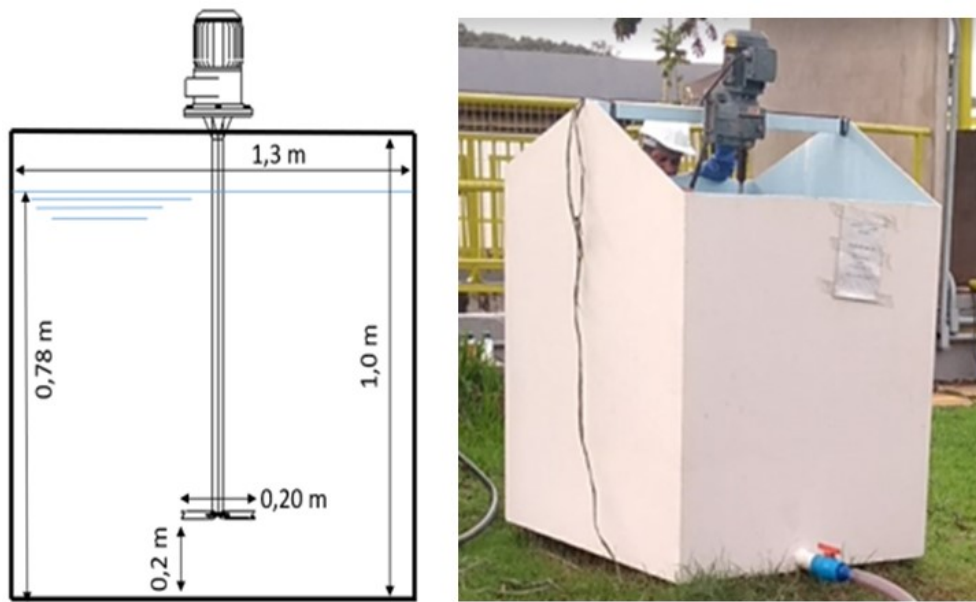


Figura 1 - Detalhes da instalação piloto de geração de resíduos



Figura 2 - Etapas da geração dos resíduos na IPGR



Os resíduos gerados foram devidamente caracterizados pelos parâmetros físico-químicos: pH, cor verdadeira, turbidez, alcalinidade, sólidos totais, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais, carbono orgânico total e carbono orgânico dissolvido, teor de sólidos e umidade. A fração sólida

de cada RETA também foi caracterizada nos seguintes parâmetros: análise qualitativa dos elementos químicos constituintes do resíduo, tamanho e distribuição das partículas e morfologia das partículas. Os equipamentos e métodos utilizados nas análises constam nas Tabelas 2 e 3.

**Tabela 2** - Equipamentos utilizados na pesquisa.

Equipamentos	Função
Jarteste, Nova Ética - modelo LDB 6	Ensaio de coagulação e floculação e sedimentação
Analizador de Carbono Orgânico Total TOC-L - marca SHIMADZU	Análise de carbono orgânico total e dissolvido
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 2100P - marca Hach	Leitura da turbidez
Master sizer 2000 - Malvern	Distribuição e tamanho de partículas
Microscópio eletrônico de varredura - Quanta 650 FEG	Morfologia das partículas e Avaliação qualitativa da fração sólida

**Tabela 3** - Parâmetros, métodos e limites de detecção utilizados na pesquisa.

Parâmetro	Unidades	Método	Limite de detecção
Alumínio	mg/L Al	EAA-Forno de grafite	0,001
Alcalinidade	mg/L	Titulométrico	0,1
Absorbância a 254 nm	-	Espectrofotométrico	0,00001
Carbono orgânico total	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo - NPOC	0,1
Carbono orgânico dissolvido	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo - NPOC	0,1
Ferro	mg/L Fe	EAA - Chama	0,01
Manganês	mg/L Ma	EAA - Chama	0,001
pH	Adimensional	Potenciométrico	0,01
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Turbidez	uT	Nefelométrico	0,1
Umidade	%	Gravimétrico	1
Distribuição e tamanho de partículas	mm	Espalhamento de partículas	0,002
Morfologia das partículas	µm	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	10
Análise qualitativa da fração sólida	-	EDS - Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X	-

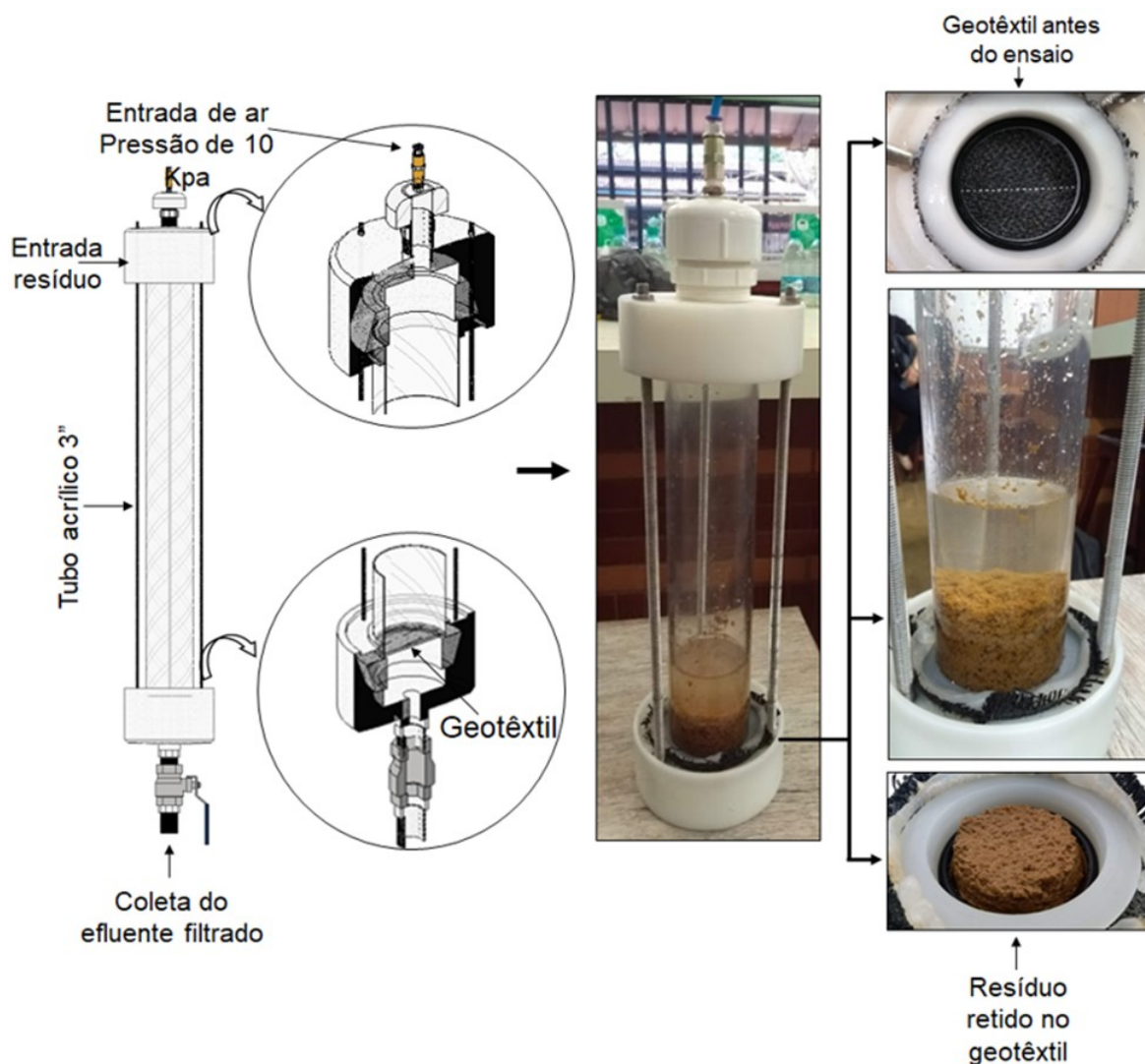
## 2.2 Ensaio de Desaguamento

Os ensaios de desaguamento em tubo geotêxtil com os RETAs produzidos foram feitos em um filtro de bancada pressurizado em geotêxtil (FPG). Esse modelo de filtro foi usado por diferentes autores, com pequenas mudanças na configuração (Moo-Young et al., 2002; Kutay e Aydilek, 2004;

Muthukumaran e Ilamparuthi, 2006; Satyamurthy e Bhatia, 2009; Grzelak et al., 2011; Khachan et al., 2014; Khachan e Bhatia, 2016). O modelo empregado na pesquisa foi adaptado do trabalho de Khachan e Bhatia (2016). Os detalhes do filtro utilizado no trabalho podem ser vistos na Fig. 3. O filtro era constituído por um tubo de

acrílico (diâmetro de 7,6 cm e altura de 50 cm) entre dois flanges de tecnil nylon. Um disco de geotêxtil foi fixado na base de um dos flanges juntamente com o tubo de acrílico, sendo acoplado um anel de borracha para formar uma vedação completa. Na parte superior do FPG tinha uma abertura rosqueável, na qual era introduzido o resíduo a ser desaguado. A pressão aplicada por cima do filtro (10 kPa) era fornecida por meio de uma mangueira de ar comprimido. A pressão foi estabelecida para simular as condições ope-

racionais em escala real (Maurer, 2011). A escolha do tipo de geotêxtil aplicado na pesquisa se deu por meio das opções encontradas nas maiores empresas fornecedoras de tubos geotêxtil para saneamento. Verificou-se que não há muita variação nas características dos geotêxteis usados no desaguamento de RETA. Assim utilizou-se apenas um tipo de geotêxtil nos ensaios. Na Tabela 4 estão as características do material geotêxtil utilizado.



**Figura 3** - Filtro pressurizado em geotêxtil utilizado na pesquisa

**Tabela 4** - Características do geotêxtil usado.

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

Os ensaios no FPG seguiram a seguinte sequência:

- 1) Foi coletada uma alíquota de 0,5 L do RETA, e armazenada em um jarro do equipamento de jarreste. Em seguida, realizou-se o condicionamento químico com polímero (catiônico), com as dosagens definidas no planejamento experimental. As condições de mistura rápida foram: tempo de mistura (30 segundos) e rotação da paleta (100 s<sup>-1</sup>);
- 2) Após o condicionamento químico, despejou-se manualmente o RETA dentro do filtro pressurizado em geotêxtil. O registro de saída do FPG ficou fechado, impedindo o início do processo de filtração;
- 3) Ao término do enchimento, a tampa superior do FPG era fechada, a pressão de ar inserida (10 KPa), o registro de saída foi aberto, permitindo a drenagem do efluente filtrado;
- 4) Durante o desaguamento, eram feitas leituras de volume do filtrado, a cada 10 segundos no primeiro minuto, e depois a cada 5 minutos.
- 5) O teste era finalizado quando a vazão de desaguamento ficava inferior a 0,0025 mL/segundo (inferior a 1 gota a cada 20 segundos) (Maurer, 2011).
- 6) Após o ensaio terminado, eram feitas análises dos seguintes parâmetros: turbidez e sólidos suspensos totais no efluente filtrado, e teor de sólidos no resíduo retido dentro do filtro de geotêxtil.

### 2.3 Planejamento estatístico experimental

Foi realizado um amplo planejamento experimental na definição da melhor ferramenta estatística a ser utilizada para interpretação dos dados gerados. Para o planejamento dos ensaios de desaguamento no FPG foi escolhida a metodologia de superfície de resposta (RSM) por meio do delineamento de face centrada (DFC). Definiu-se que os delineamentos de face centradas (DFC) seriam de duas variáveis independentes: concentração inicial de SST do resíduo ( $X_1$ ) e dosagem de polímero ( $X_2$ ). Para a variável  $X_1$ , concentração inicial de SST do resíduo, o nível máximo adotado (+1) foi de 20 g/L, sendo estabelecido como um valor característico das descargas de decantadores, e o nível médio (0) de 12,5 g/L, como sendo típico de um tanque de mistura do sedimento da água de lavagem de filtros e das descargas de decantadores. O nível mínimo (-1) resultou em 5 g/L. Os valores de níveis para a variável  $X_2$ , dosagem do polímero, foram baseados na literatura. Foi constatada grande variação de dosagens de polímeros em trabalhos com desaguamento de RETA (0,5 a 8 mg/gSST). Assim, para abranger essas dosagens, para cada tipo de RETA foram feitas duas faixas de DFC, sendo a primeira faixa (DFC 1) variando de 0,5 (-1), 2,25 (0) e 4,0 (+1) mg/gSST, e a segunda faixa (DFC 2) com dosagens de 4,0 (-1), 6,0 (0) e 8,0 (+1) mg/gSST. A Tabela 5 mostra como ficaram os ensaios para os delineamentos. Cada DFC foi composto por 11 ensaios, sendo três ensaios repetições no ponto central (0), para avaliar o erro amostral.

Uma vez estabelecidas as variáveis independentes ( $X_1$  e  $X_2$ ), buscou-se definir as variáveis dependentes (Y). Uma variável dependente (ou resposta) é aquela cujo valor depende da forma como a variável independente é modificada. No caso dos ensaios com o FPG, as variáveis dependentes foram os índices de desempenho do desaguamento, sendo eles: Eficiência de filtração



(EF), turbidez do filtrado, teor de sólidos do resíduo desaguado e tempo de desaguamento.

Tanto no planejamento experimental como para avaliação dos resultados foi utilizado o softwa-

re online Protimiza Experimental Design (<http://experimental-design.protimiza.com.br/>), seguindo a metodologia proposta por Rodrigues e lemma (2014).

**Tabela 5** - Planejamento dos ensaios realizados para os delineamentos de face centrada.

Ensaio	Planejamento - DFC 1		Planejamento - DFC 2	
	X <sub>1</sub> : Concentração inicial de SST do resíduo (g/L)	X <sub>2</sub> : Dosagem de Polímero (mg/gSST)	X <sub>1</sub> : Concentração inicial de SST do resíduo (g/L)	X <sub>2</sub> : Dosagem de Polímero (mg/gSST)
1	5,0 (-1)	0,5 (-1)	5,0 (-1)	4,0 (-1)
2	20 (+1)	0,5 (-1)	20 (+1)	4,0 (-1)
3	5,0 (-1)	4,0 (+1)	5,0 (-1)	8,0 (+1)
4	20 (+1)	4,0 (+1)	20 (+1)	8,0 (+1)
5	5,0 (-1)	2,0 (0)	5,0 (-1)	6,0 (0)
6	20 (+1)	2,0 (0)	20 (+1)	6,0 (0)
7	12,5 (0)	0,5 (-1)	12,5 (0)	4,0 (-1)
8	12,5 (0)	4,0 (+1)	12,5 (0)	8,0 (+1)
9	12,5 (0)	2,0 (0)	12,5 (0)	6,0 (0)
10	12,5 (0)	2,0 (0)	12,5 (0)	6,0 (0)
11	12,5 (0)	2,0 (0)	12,5 (0)	6,0 (0)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização dos resíduos

A Tabela 6 apresenta a caracterização físico-química dos dois tipos de resíduos preparados, com concentrações iniciais de SST do resíduo de 5, 12,5 e 20 g/L para cada tipo de RETA. Já a Tabela 6 mostra os dados da análise qualitativa realizada na fração sólida de cada RETA. Uma caracte-

rística importante a ser observada nos estudos de desaguamento de RETAs é o teor de umidade. Os valores elevados de umidade encontrados para os RETAs e suas concentrações diluídas são similares aos encontrados por outros autores que também caracterizaram RETA em ETAs de ciclo completo (Guanaes, 2009; Tominaga, 2010; Guimarães et al., 2014).

**Tabela 6** - Caracterização físico-química das três concentrações de SST preparadas para cada tipo de RETA.

Parâmetros	RETA Tipo I			RETA Tipo II		
	5 g/L	12,5 g/L	20 g/L	5 g/L	12,5 g/L	20 g/L
Alcalinidade (mg/L)	60,05	80,61	97,10	40,00	38,37	36,13
pH	7,4	7,68	7,76	6,59	6,26	6,29
Cor Verdadeira (uH)	12	17	21	14	13	17
Turbidez (uT)	6.280	10.780	18.950	10.450	17.800	28.600
Sólidos Totais (mg/L)	5.277	13.161	20.853	5.009	12.338	20.473
Sólidos Suspensos (mg/L)	5.100	12.980	20.598	4.873	12.183	20.257
Sólidos Dissolvidos (mg/L)	177	181	255	136	155	216
Teor de Sólidos (%)	0,46	1,23	2,05	0,53	1,30	2,02
Umidade (%)	21.846	7.708	4.821	18.612	7.134	4.843

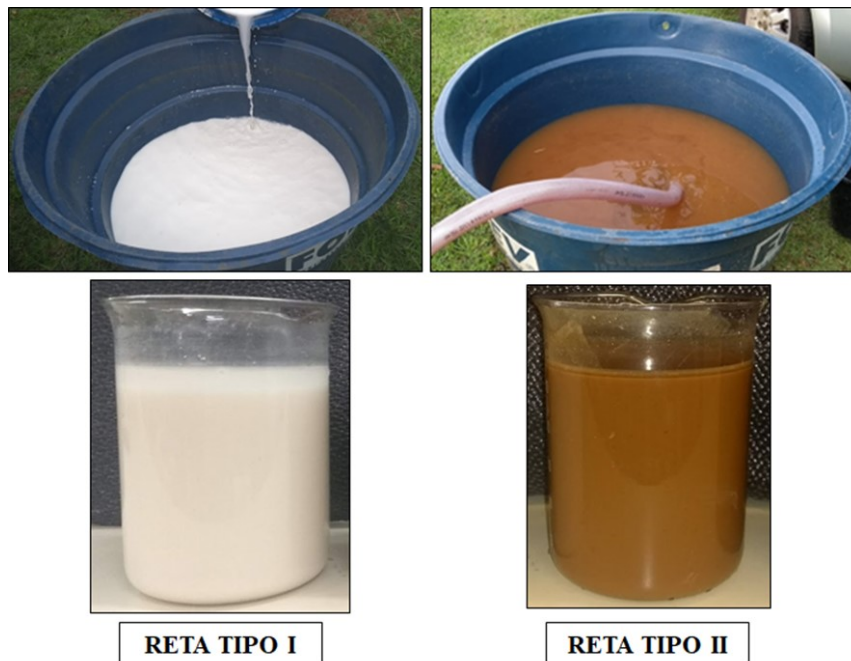
A Tabela 7 apresenta os constituintes químicos encontrados na fração sólida dos dois tipos de RETA. A presença de oxigênio encontrada em todos os resíduos se deve a possíveis substâncias (compostos oxigenados) formadas com os elementos químicos alumínio (Al), silício (Si), carbono (C) e ferro (Fe). Como exemplos de compostos oxigenados, pode-se esperar a presença de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), que pode estar associada à presença de areia na água bruta (encontrados em minerais, areias e silicatos), o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), também conhecido como alumina, que pode estar relacionado ao uso de coagulante do tipo sulfato de alumínio no processo de tratamento.

Nos dois tipos de RETA, as concentrações de alumínio resultaram elevadas, com valores similares entre os resíduos. O RETA tipo I apresentou grande prevalência de minerais, principalmente a sílica (34,9%), em razão da suspensão de caulinita.

O RETA tipo II se diferenciou pela presença de uma parcela orgânica (1,2% de carbono) na sua composição. A Fig. 4 mostra o aspecto visual de cada RETA produzido. Nota-se uma composição bem distinta para cada tipo de resíduo.

**Tabela 7** - Análise qualitativa dos elementos químicos constituintes na parte sólida dos dois tipos de resíduo, usando o método EDS da microscopia eletrônica.

Parâmetros	RETA Tipo I	RETA Tipo II
Carbono	-	1,2 %
Alumínio	24,3 %	27,8 %
Ferro	10,5 %	21,3 %
Manganês	3,0 %	4,0 %
Sílica	34,9 %	23,9 %
Potássio	3,1 %	1,4 %
Oxigênio	20,0 %	18,3 %
Cálcio	0,2 %	1,0 %
Sódio	0,4 %	-
Nióbio	3,0 %	-
Molibdênio	0,7 %	-
Titânio	-	1,20%



**Figura 4** - Imagens dos dois tipos de resíduos de tratamento de água (RETA) estudados

A Fig. 5 mostra as imagens de microscopia eletrônica de varredura realizadas nos RETAs. Por meio dessas imagens, pode-se avaliar a morfologia das partículas que constituem os resíduos. Para Barroso (2007), o conhecimento da morfologia de RETAs é de fundamental importância, pois tais características influenciam nos mecanismos de desaguamento e secagem dos resíduos.

Para cada tipo de RETA são apresentadas duas imagens com níveis de detalhamento diferentes, de 100 e 10.000 vezes do tamanho real. Comparando as imagens, são verificadas diferenças nítidas em relação aos resíduos. O RETA tipo I

possui estruturas mais uniformes e lineares, indicando a forte presença de minerais (caulinita). O RETA tipo II é o que possui a forma mais heterogênea dos resíduos analisados, com uma mistura de materiais minerais e orgânicos.

A Fig. 6 apresenta o gráfico com a distribuição do tamanho das partículas para cada RETA. O RETA tipo I obteve os menores tamanhos de partículas, e o RETA tipo II apresentou os maiores valores. Os resultados mostram que o tipo da água bruta interfere diretamente no tamanho final das partículas do RETA.

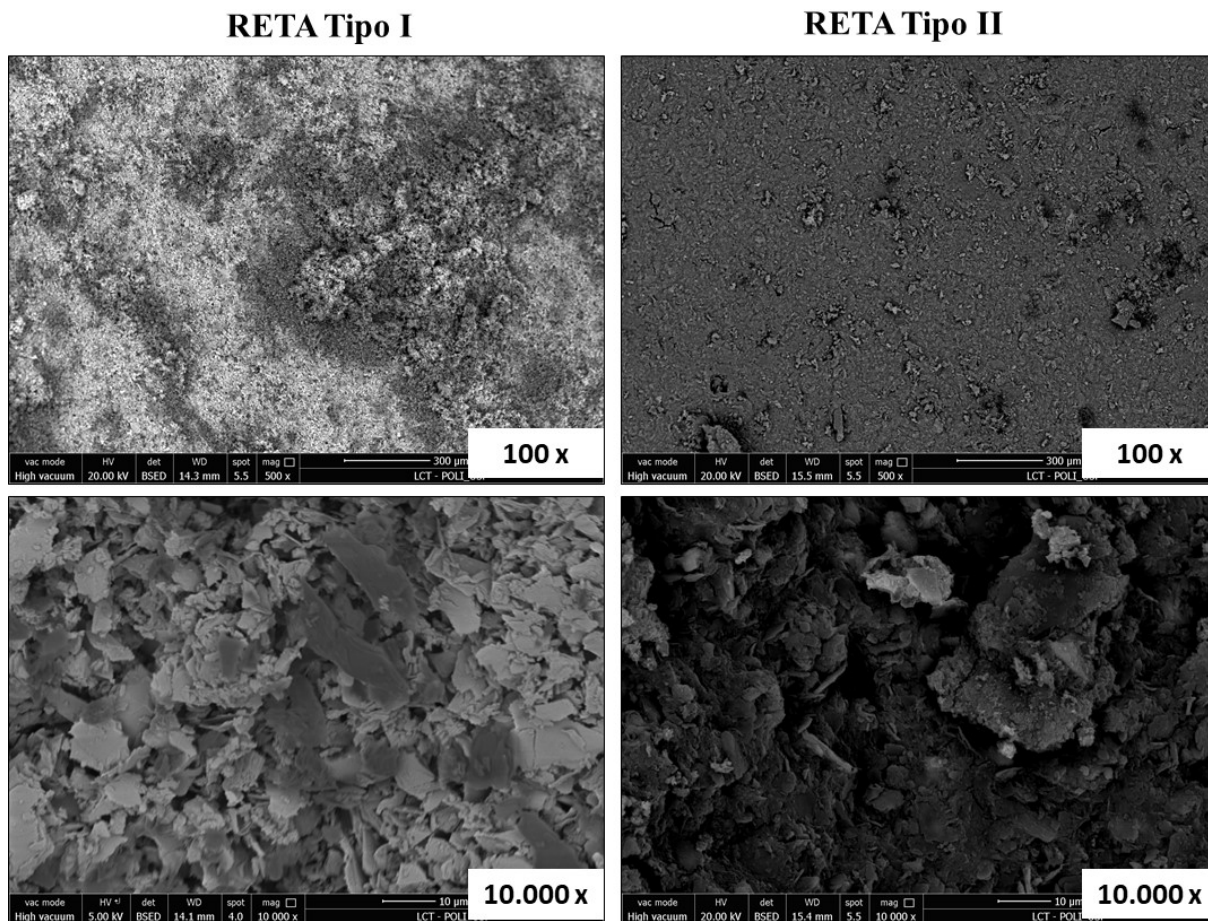


Figura 5 - Morfologia das partículas (imagem de MEV) dos RETAs

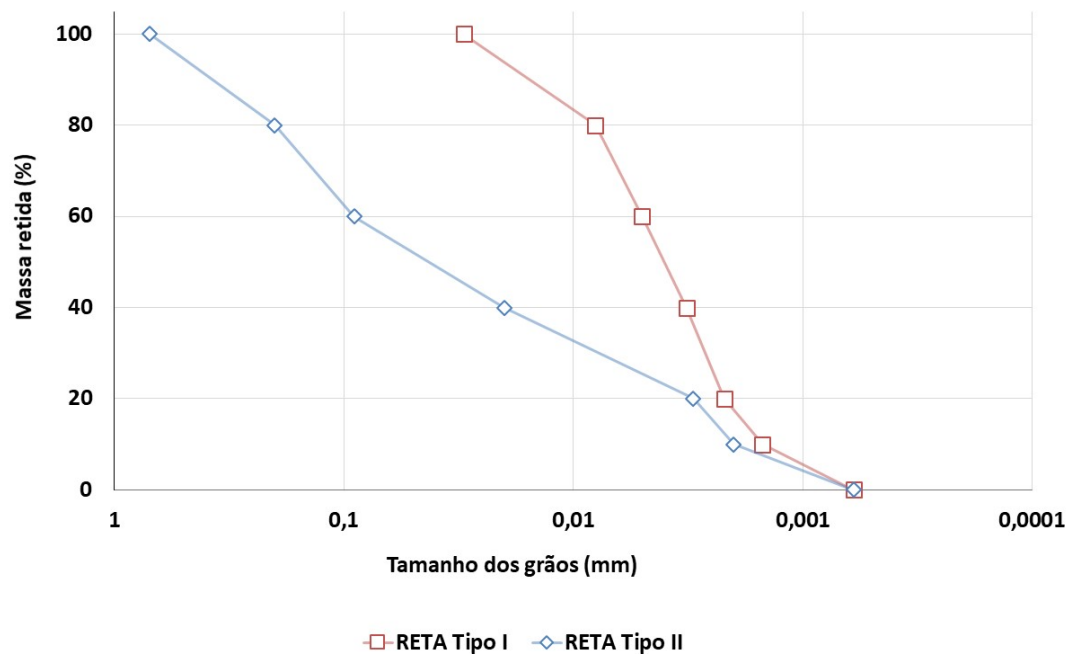


Figura 6 - Distribuição do tamanho das partículas presentes nos RETAs

### 3.2 Resultados dos ensaios de desaguamento no FPG

As Tabelas 8 e 10 apresentam os resultados dos ensaios de desaguamento para os delineamentos DFC 1 e DFC 2, respectivamente. A partir dos dados obtidos, calcularam-se os coeficientes de regressão e construíram-se modelos matemáticos para as respostas: eficiência de filtração (EF), turbidez do filtrado, teor de sólidos no resíduo desaguado e tempo de desaguamento. 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  $X_2$ ) e as variáveis respostas (Tabelas 9 e 11).

Cada modelo matemático foi submetido a análise de variância (ANOVA), onde verificou-se a adequação dos valores previstos com os valores experimentais. Pode-se observar que os valo-

res de  $p$ -valor da ANOVA (Tabelas 9 e 11) para todos os modelos ficaram abaixo de 0,05, ou seja, os modelos foram significativos ao nível de confiança de 95%. Assim, validados os modelos matemáticos pela ANOVA, foram gerados os gráficos de superfície de resposta para cada índice de desempenho.

As Fig. 7, 8, 9 e 10 apresentam os gráficos com as superfícies de resposta para os índices de desempenho avaliados nos delineamentos DFC 1 e DFC 2. Cabe ressaltar que a diferença básica dos delineamentos experimentais DFC 1 para o DFC 2 foi a variação dos níveis testados da variável  $X_2$  (dosagem de polímero), sendo que no DFC 1 foram exploradas dosagens de 0,5, 2,25 e 4,0 mg/gSST, e no DFC 2 a faixa foi ampliada para 4,0, 6,0 e 8,0 mg/gSST. Os níveis da variável  $X_1$  (concentração de SST no resíduo) foram mantidos nos dois delineamentos (5, 12,5 e 20 g/L).

**Tabela 8 - Resultados do planejamento experimental DFC 1.**

Ensaio	Variáveis		Eficiência de filtração (%)		Turbidez (uT)		Teor de Sólidos (%)		Tempo de desaguamento (min)	
	Concentração inicial de SST do resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mg/gSST)	Tipo I	Tipo II	Tipo I	Tipo II	Tipo I	Tipo II	Tipo I	Tipo II
1	5,0	0,5	19,4	19,7	5412	3815	32,4	14,3	6,4	8,3
2	20,0	0,5	33,4	41,0	15458	11564	34,6	18,7	9,3	19,8
3	5,0	4,0	25,9	71,3	3630	1276	33,5	14,8	1,9	13,4
4	20,0	4,0	99,9	99,9	85	7,0	40,7	12,8	12,5	48,4
5	5,0	2,0	9,8	38,9	4674	3207	33,2	12,4	2,4	8,3
6	20,0	2,0	87,4	99,9	3032	2,0	41,3	13,2	18,2	19,2
7	12,5	0,5	14,2	15,0	12439	9780	31,7	17,0	4,0	4,2
8	12,5	4,0	66,0	97,8	4170	278	34,8	14,7	9,9	33,6
9	12,5	2,0	32,5	92,6	10132	806	32,2	19,5	9,1	45,5
10	12,5	2,0	32,0	92,8	11203	795	31,0	19,2	9,0	44,4
11	12,5	2,0	32,8	92,4	10568	824	31,8	19,3	9,2	46,2

**Tabela 9 - Tratamento estatístico do delineamento DFC 1.**

Parâmetros	Tipo de RETA	Modelos estatísticos	R <sup>2</sup>	ANOVA p-valor
Eficiência de Filtração	Tipo I	$Y = 41,21 + 27,60x_1 + 20,80x_2 + 15x_1x_2$	90,5%	0,0006
	Tipo II	$Y = 83,33 + 18,52x_1 + 32,23x_2 - 25,86x_2^2$	88,2%	0,0012
Turbidez	Tipo I	$Y = 9702,40 - 4320,57x_1^2 + 4237,33x_2 - 3397,75x_1x_2$	88,7%	0,0011
	Tipo II	$Y = 1127 - 3933x_2 + 3326,33x_2^2 + 2254,50x_1x_2$	88,0%	0,0013
Teor de Sólidos	Tipo I	$Y = 32,30 + 2,92x_1 + 3,65x_1^2 + 1,72x_2$	84,7%	0,0030
	Tipo II	$Y = 17,94 - 3,57x_1^2$	81,2%	0,0255
Tempo de Desaguamento	Tipo I	$Y = 8,35 + 4,88x_1$	75,1%	0,0026
	Tipo II	$Y = 34,78 + 9,57x_1 + 15,22x_1^2 + 10,52x_2$	79,6%	0,0034

**Tabela 10 - Resultados do planejamento experimental DFC 2.**

Ensaio	Variáveis		Eficiência de filtração (%)		Turbidez (uT)		Teor de Sólidos (%)		Tempo de desaguamento (min)	
	Concentração inicial de SST do resíduo (g/L)	Dosagem de Polímero (mg/gSST)	Tipo I	Tipo II	Tipo I	Tipo II	Tipo I	Tipo II	Tipo I	Tipo II
1	5,0	4,0	25,9	71,3	3630	1276	33,5	14,8	1,9	13,4
2	20,0	4,0	99,9	100,0	85,2	7,0	40,7	12,8	12,5	48,4
3	5,0	8,0	45,9	95,7	2814	227	31,9	18,9	5,1	23,6
4	20,0	8,0	99,8	100,0	25,5	5,0	40,3	11,7	64,6	52,0
5	5,0	6,0	36,8	84,6	3194,4	710	32,4	19,0	2,8	14,4
6	20,0	6,0	99,5	100,0	50,1	8,0	40,6	12,9	49,6	41,0
7	12,5	4,0	66,0	97,8	4169,6	278	34,8	14,7	9,9	33,6
8	12,5	8,0	99,9	99,9	88,5	12,0	39,6	16,5	19,0	52,6
9	12,5	6,0	88,5	98,1	1276,7	226	40,2	16,0	14,0	51,7
10	12,5	6,0	89,2	98,1	1340	251	40,0	15,8	14,6	51,2
11	12,5	6,0	87,9	98,1	1159	235	39,8	15,2	14,2	50,9

**Tabela 11 - Tratamento estatístico do delineamento DFC 2.**

Parâmetros	Tipo de RETA	Modelos estatísticos	R <sup>2</sup>	ANOVA p-valor
Eficiência de Filtração	Tipo I	$Y = 86,30 + 31,77x_1 - 18,34x_1^2 + 8,97x_2$	95,6%	<0,0001
	Tipo II	$Y = 98,39 + 8,07x_1 - 6,46x_1^2 + 4,42x_2 - 6,10x_2^2$	95,0%	0,0003
Turbidez	Tipo I	$Y = 1621,18 - 1579,60x_1 - 826,13x_2$	77,6%	0,0025
	Tipo II	$Y = 200,40 - 365,50x_1 + 171,77x_1^2 - 219,50x_2 + 261,75x_1x_2$	97,7%	<0,0001
Teor de Sólidos	Tipo I	$Y = 38,88 + 3,97x_1 - 2,31x_1^2$	82,9%	0,0008
	Tipo II	$Y = 15,30 - 2,55x_1 + 0,80x_2 - 1,30x_1x_2$	91,1%	0,0004
Tempo de Desaguamento	Tipo I	$Y = 14,18 + 19,48x_1 + 8,57x_1^2 - 10,73x_2 + 12,22x_1x_2$	95,0%	0,0004
	Tipo II	$Y = 47,97 + 15,02x_1 - 15,86x_1^2 + 5,47x_2$	91,4%	0,0004

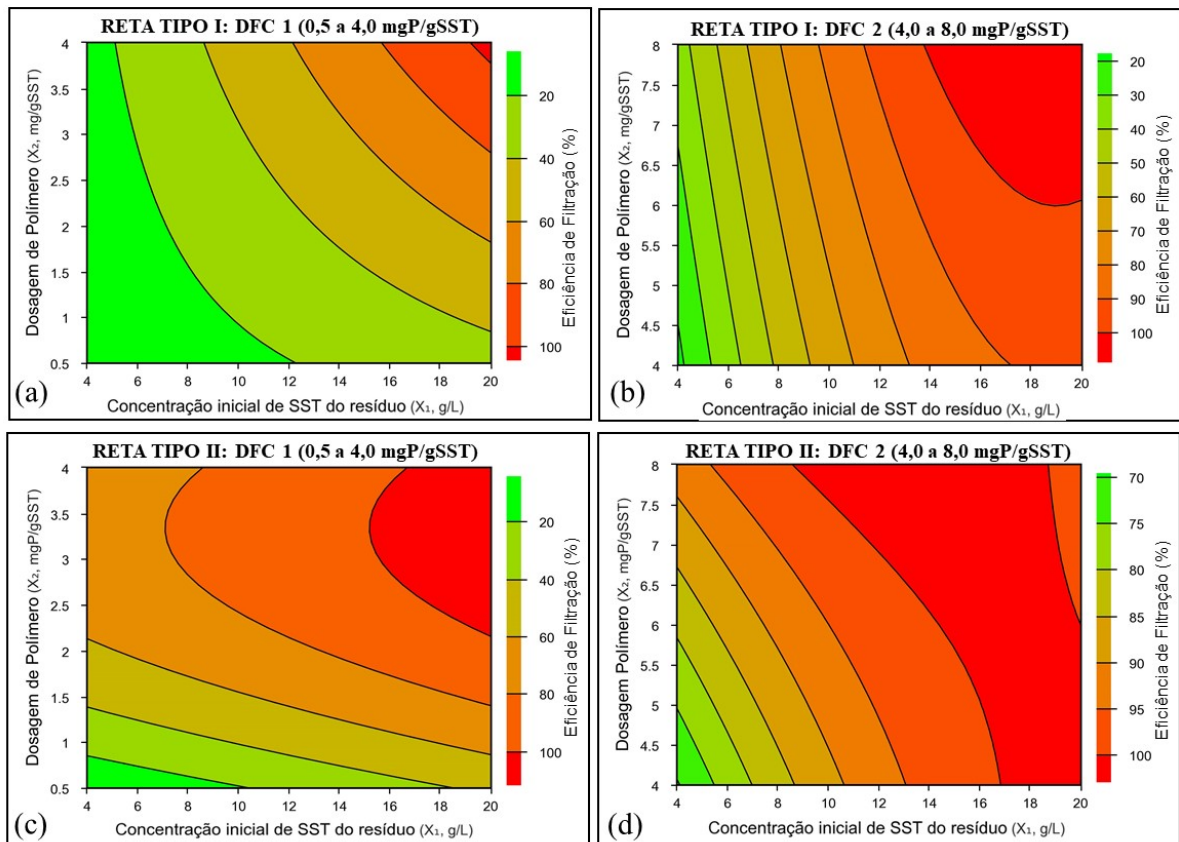


A Fig. 7 mostra os gráficos para superfície de resposta para a eficiência de filtração. A eficiência de filtração é o índice de desempenho mais utilizado na literatura para avaliar o grau de retenção de partículas sólidas pelos tubos geotêxteis. Esse índice mede o percentual de remoção dos SST afluente em relação ao SST do efluente filtrado.

Observando os dados para o RETA tipo I (Fig. 7a e 7b), verifica-se nitidamente a elevação dos valores de eficiência de filtração à medida em que se aumentam associadamente as variáveis  $X_1$  (concentração inicial de SST do resíduo) e  $X_2$  (dosagem de polímero). Nota-se, nos delineamentos com dosagens de polímero na faixa de 0,5 a 4,0 mgP/gSST, que valores de EF acima de 90% somente foram alcançados na região de máximo valor de  $X_1$  (20 g/L) e máximo valor de  $X_2$  (4,0 mgP/gSST). Para concentrações de  $X_1$  meno-

res que 10 g/L, a eficiência de filtração diminuiu e não alcançou valores de 50% de remoção.

Assim como nos resultados do RETA tipo I, no RETA tipo II (Fig. 7c e 7d) também ocorreu um aumento da EF à medida que se elevou a concentração inicial de SST do resíduo. O que se verifica é que a variável  $X_1$  exerce grande influência no processo de retenção dos sólidos nos tubos geotêxteis. A dosagem de polímero também exerceu papel fundamental nos resultados de EF. Verifica-se, pelas superfícies de resposta, que o alcance de valores de EF acima de 90% nas regiões onde a concentração inicial de SST no resíduo é menor (<10 g/L) só foi possível com dosagens de polímero mais elevadas (> 7,0 mgP/gSST). Entretanto, para o RETA tipo I mesmo com altas dosagens de polímero, nas regiões de  $X_1$  abaixo de 10 g/L, os valores de EF não alcançaram 60% de remoção.



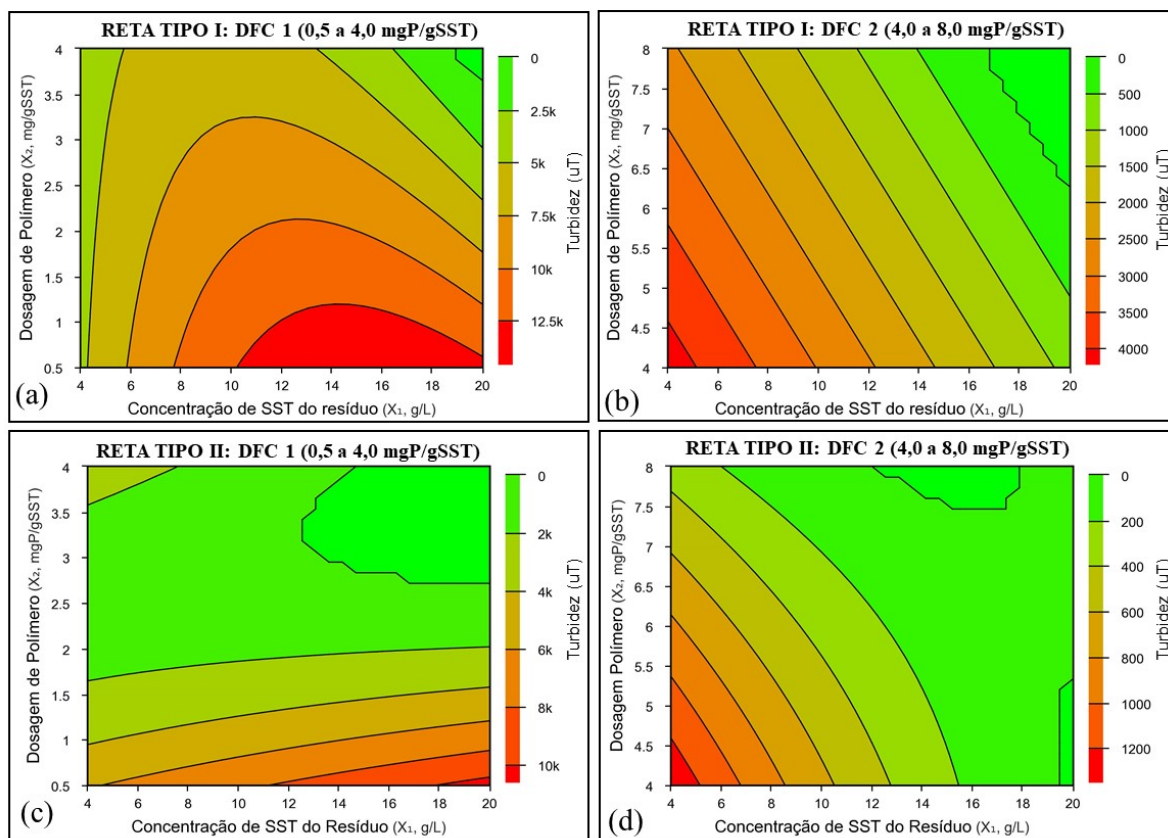
**Figura 7** - Superfícies de resposta da eficiência de filtração para: (a) RETA tipo I DFC 1, (b) RETA tipo I DFC 2, (c) RETA tipo II DFC 1, (d) RETA tipo II DFC 2

A Fig. 8 apresenta os gráficos de superfície de resposta para a turbidez do filtrado. O comportamento para turbidez foi semelhante ao encontrado pela eficiência de filtração. A região nos gráficos com os maiores índices de eficiência de filtração é a mesma com os menores valores de turbidez, para os dois tipos de RETA. Quanto maior a concentração inicial de SST no resíduo, menores foram os valores de turbidez no efluente filtrado. A dosagem de polímero também influenciou diretamente na turbidez, com os menores valores sendo atingidos com dosagens superiores a 7 mgP/gSST.

Geralmente, em sistemas de tratamento de RETA, o efluente filtrado das unidades de desaguamento pode ter dois destinos: ou é descartado em corpos hídricos, ou é recirculado ao início do tratamento da ETA. O padrão de qualidade que as empresas de saneamento utilizam para o descarte

normalmente é o valor máximo permitido de turbidez para corpos hídricos classe 2, que segundo a resolução Conama 357/05, é de 100 uT. Para o reaproveitamento do filtrado na própria ETA, devido à falta de norma ou legislação específica no Brasil, utilizam-se valores preconizados internacionalmente, como no caso do Reino Unido, que estabelece um valor máximo de 5 uT.

Utilizando esses padrões de turbidez citados acima como referência, verificou-se que somente na concentração inicial de SST do resíduo de 20 g/L foram obtidos valores próximos ao recomendado para recirculação em ETA, resultando em valores abaixo de 5,0 uT de turbidez para dosagens de polímero próximas a 8,0 mgP/gSST. Para o descarte do efluente filtrado em corpos d'água, o RETA tipo I para concentrações abaixo de 10 g/L obteve resultados acima de 100 uT, inviabilizando o descarte do efluente em corpo hídrico.

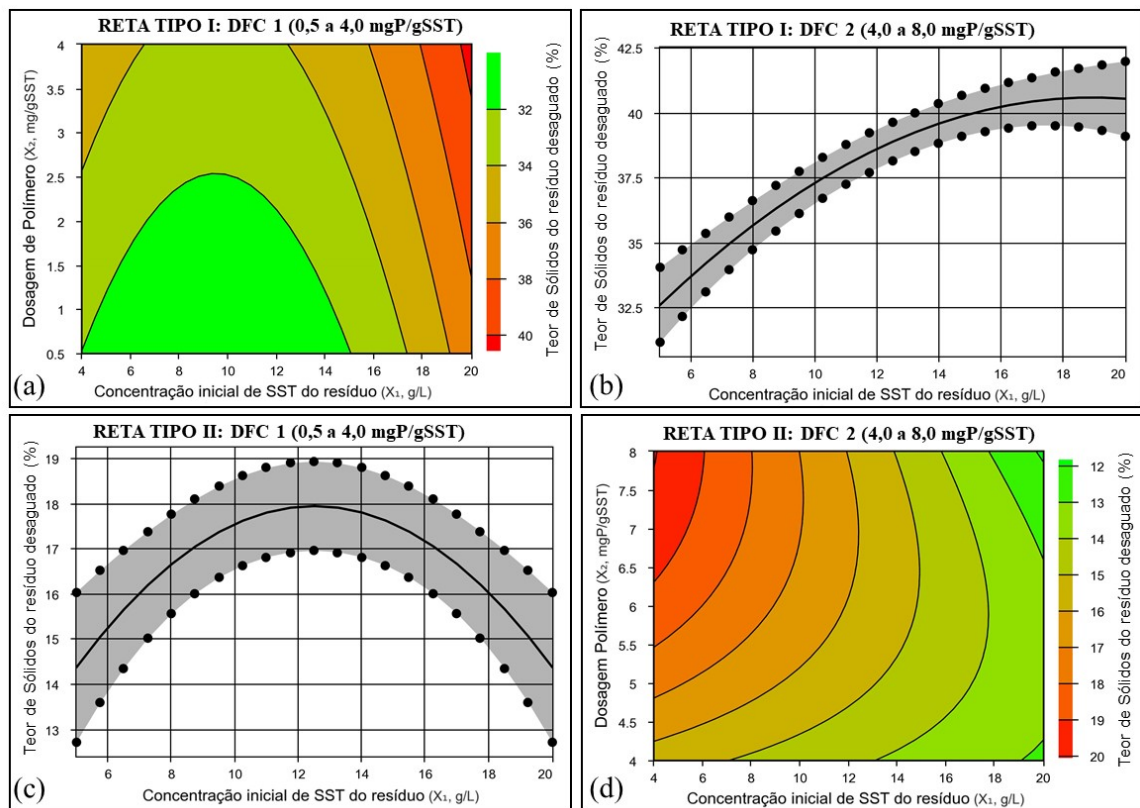


**Figura 8** - Superfícies de resposta da turbidez do filtrado: (a) RETA tipo I DFC 1, (b) RETA tipo I DFC 2, (c) RETA tipo II DFC 1, (d) RETA tipo II DFC 2

A Fig. 9 mostra os gráficos com a superfície de resposta para o índice teor de sólidos do resíduo desaguado em função das variáveis  $X_1$  e  $X_2$ . Em relação ao RETA tipo I (Fig. 9a e 9b), constata-se nos gráficos que houve um efeito positivo das variáveis  $X_1$  e  $X_2$  nos valores de teor de sólidos do resíduo desaguado. À medida em que se aumentou a concentração inicial de SST do RETA e da dosagem do polímero, o teor de sólidos no resíduo desaguado também aumentou. Vários trabalhos na literatura (Worley et al., 2007, Myers e Elton, 2010, Khachan et al., 2011), que utilizaram a filtração em tubo geotêxtil no desaguamento de resíduos de dragagem de rios poluídos, encontraram resultados diferentes do ocorrido com o teor de sólidos do presente estudo. Os autores relatam que há uma tendência de diminuição do teor de sólidos à medida em que se aumenta a dosagem de polímero. Uma explicação possível para essa tendência é o fato de que os polímeros são muitas vezes hidrofílicos, fazendo

com que os flocos tenham a umidade aumentada (Bhatia et al., 2013). Contudo, essa observação não foi constatada no RETA tipo I.

O RETA tipo II (Fig. 9c e 9d) teve comportamento diferente em relação ao RETA tipo I. Na faixa DFC 1, não houve efeito estatístico nas mudanças da dosagem de polímero (variável  $X_2$ ), ficando os valores de teor de sólidos em função apenas da variável  $X_1$ . Ao mudar a faixa de dosagem para o DFC 2, a variável  $X_2$  obteve significância estatística, e a variável  $X_1$  apresentou efeito negativo sobre a resposta, resultando em menores valores de teor de sólidos do resíduo desaguado na região de alta concentração inicial de SST do resíduo (20 g/L). Comparando os resultados dos RETAs, verifica-se que o tipo da água bruta influenciou diretamente nos resultados do teor de sólidos para o resíduo já desaguado. Enquanto o RETA tipo I obteve valores médios de teor de sólidos de 37%, o RETA tipo II atingiu valores médios de apenas 15%.



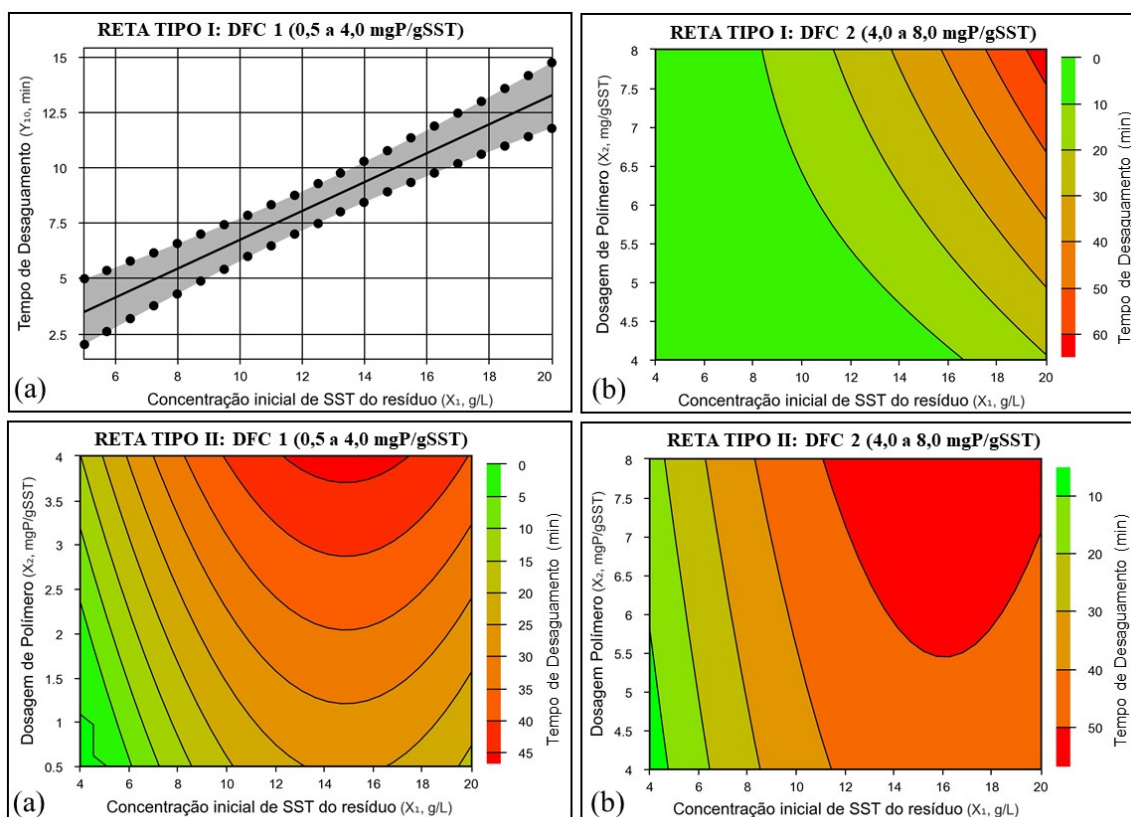
**Figura 9** - Superfícies de resposta do teor de sólidos no resíduo desaguado para: (a) RETA tipo I DFC 1, (b) RETA tipo I DFC 2, (c) RETA tipo II DFC 1, (d) RETA tipo II DFC 2

Um dos principais objetivos a serem atingidos pelo desaguamento em tubos geotêxteis é a filtração no menor tempo possível, sem que ocorra perda de sólidos. O tempo de desaguamento é um fator muito importante para avaliar o desempenho do condicionamento químico no sistema.

A Fig. 10 apresenta os gráficos com as superfícies de resposta para o tempo de desaguamento nos diferentes RETA estudados. Verifica-se que os RETAs tipo I e tipo II tiveram comportamentos semelhantes nos efeitos das variáveis  $X_1$  e  $X_2$  para os resultados do tempo de desaguamento. Os maiores valores de tempo de desaguamen-

to estiveram na região de  $X_1$  próximo a 20 g/L. Outro detalhe a destacar é que diferentes dosagens de polímero ( $X_2$ ) para valores de  $X_1$  entre 5 e 10 g/L não alteraram significativamente o tempo de desaguamento.

O que foi verificado é que, quando se diminuiu a dosagem de polímero para obter tempos menores de desaguamento, houve um comprometimento do efluente filtrado com a perda de sólidos. Assim, deve-se encontrar uma dosagem ótima com o menor tempo de desaguamento, e que concomitantemente atenda aos requisitos de qualidade do efluente desejado.



**Figura 10** - Superfícies de resposta do tempo de desaguamento para: (a) RETA tipo I DFC 1, (b) RETA tipo I DFC 2, (c) RETA tipo II DFC 1, (d) RETA tipo II DFC 2



#### 4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- Os dois tipos de resíduos de ETA gerados no trabalho alcançaram características físico-químicas distintas e atreladas às respectivas águas brutas de origem para cada resíduo;
- O ensaio de bancada com filtro pressurizado em tubo geotêxtil confirmou-se como um método simples e eficiente na predição de parâmetros importantes que só poderiam ser obtidos em escala-piloto ou escala real, como o teor de sólidos do resíduo desaguado, a qualidade do efluente filtrado e o melhor condicionamento químico;
- A metodologia estatística de superfície de resposta (RSM) indicou ser uma ferramenta eficiente tanto no planejamento experimental dos ensaios como na geração, interpretação e otimização dos resultados obtidos;
- O tipo de RETA foi determinante nos resultados de teor de sólidos no resíduo desaguado. A característica específica de cada RETA teve influência preponderante sobre o teor de sólidos no resíduo desaguado, quando comparada às demais variáveis estudadas (dosagem de polímero e a concentração inicial de SST do resíduo), ressaltando que o RETA tipo I era proveniente de água sintética de caulinita;
- Os maiores teores de sólidos no resíduo desaguado foram obtidos com o RETA tipo I ( $\cong 37\%$ ), seguido pelo RETA tipo II com valores médios de 15%;
- A concentração inicial de SST do resíduo teve efeito direto no desaguamento em tubo geotêxtil, principalmente na capacidade de retenção de sólidos. A utilização do resíduo com concentração de SST  $< 10$  g/L não foi capaz de produzir efluente filtrado com turbidez inferior a 100 uT;
- A filtração em tubo geotêxtil é uma tecnologia eficiente e totalmente indicada para o desaguamento de resíduos de ETAs. Contudo, há a necessidade de realizar ensaios de tratabilidade com o RETA a ser desaguado antes da implantação do

sistema de tratamento. Cada resíduo tem uma característica específica, podendo necessitar de adequações no adensamento, condicionamento químico e principalmente na estimativa do teor de sólidos final do resíduo desaguado;

- Recomenda-se que nas estações de tratamento de água os resíduos da lavagem de filtros passem pelo processo de clarificação/adensamento antes de serem direcionados para o sistema de tubos geotêxtil, a fim de elevar a concentração de SST para no mínimo 10 g/L.

#### 5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

#### 6 REFERÊNCIAS

- APHA. American Water Works Association and Water Environmental Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22<sup>th</sup> edition, Washington, USA, 2012.
- BARROSO, M. M.. **Influência das micro e macropropriedades dos lodos de Estações de Tratamento de Águas nos desaguamentos por leito de drenagem**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2007
- BRASIL. Lei 9.605/98. **“Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.”** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 1998
- DANTAS, A. D. **Desempenho de sistemas de dupla filtração no tratamento de água com turbidez elevada**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2<sup>a</sup>. ed. São Carlos - SP: RIMA, v. 1 e 2, 2005
- DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D., VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. Editora LDiBe, São Carlos – SP, 2012. 540 p.
- GRZELAK, M.S., MAURER, B.S., PULLEN, T.S., BHATIA, S.K., RAMARAO, B.V. A Comparison of Test Methods Adopted for Assessing Geotextile Tube Dewatering Performance. **Conference Paper in Geotechnical Special Publication** March 2011.



- GUANAES, E. A. **Análise do Desaguamento do Lodo Residual de Estação de Tratamento de Água por Meio de Geossintéticos**. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), CEFET, Minas Gerais, 2009.
- GUIMARAES, G. C. **Estudo do adensamento e desidratação dos resíduos gerados na ETA-Brasília**. Dissertação (Mestrado em engenharia civil e ambiental), Universidade de Brasília/UNB. Brasília, 2007.
- GUIMARÃES, M. G. A., URASHIMA D. C., VIDAL D. M. Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems. **Geosynthetics International** 5 (21), 310-320, 2014. <https://dx.doi.org/10.1680/gein.14.00018>
- KHACHAN, M.M., BADER, R.A., BHATIA, S.K., and MAURER, B.W. Comparative dewatering performance of slurries conditioned with synthetic polymers vs. Ecofriendly polymers. **Advances in Geotechnical Engineering** (J. Han and D.A. Alzamora, eds.), ASCE Geotechnical Special Publication 211: 3050-3058, 2011.
- KHACHAN, M. M.; BHATIA S.K.; R. A. BADER; D. CETIN; B. V. RAMARAO. Cationic starch flocculants as an alternative to synthetic polymers in geotextile tube dewatering. **Geosynthetics International**, v. 21, p. 119-136, 2014. <http://dx.doi.org/10.1680/gein.14.00003>
- KHACHAN, M. M.; BHATIA S.K. The efficacy and use of small centrifuge for evaluating geotextile tube dewatering performance. **Geotextiles and Geomembranes** (45) 280-293, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.04.001>
- KOERNER, G. R.; KOERNER, M. R. Geotextile tube assessment using a hanging bag test. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 24, n. 2, p. 129-37, 2006.
- KUTAY, M. E.; AYDILEK, A. H. Retention performance of geotextile containers confining geomaterials. **Geosynthetics International**, v. 11, p. 100-113, 2004.
- LAWSON C. R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. **Geosynthetics International** 6(15)384-427, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.04.001>
- LIAO, K.; BHATIA, S. Evaluation on filtration performance of woven geotextiles by falling head, pressure filtration test, and hanging bag tests. In: International conference on geosynthetics, 8., 2006, Yokohama. **Anais...** Proceedings Rotterdam: Millpress, 2006.
- MAURER, B. W. **Flocculation and Filtration in the Geotextile Tube Environment**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Civil), The Syracuse University, 2011.
- MORGAN, K. R. **Geotextile tubes and their application to dewatering**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Aplicada) - Georgia Southern University, Georgia-USA. 147 p. 2014.
- MOO-YOUNG, H. K., GAFFNEY, D. A., MO, X. Testing Procedures to assess the viability of dewatering with geotextiles tubes. **Geotextiles and Geomembranes** 5 (20) 289-303.
- MYERS, W.S. AND ELTON, D.J. (2011) Dewatering rock crushing fines using Geotextile tubes. **Advances in Geotechnical Engineering** (J. Han and D.A. Alzamora, eds.), ASCE Geotechnical Special Publication 211: 2111-2120.
- MUTHUKUMARAN, A. E.; ILAMPARUTHI, K. Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 24, p. 210-219, 2006.
- RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. **Experimental Design and Process Optimization**, CRC Press, New York, 2014.
- SATYAMURTHY R., BHATIA S.K. Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles. **Geosynthetics International** 2 (16) 83-96, 2009. <https://doi.org/10.1680/gein.2009.16.2.83>
- SILVA, B. M. **Influência da concentração de sólidos suspensos totais no lodo a ser desaguado em geotecido**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental). Universidade de Ribeirão Preto-UNAERP, Ribeirão Preto, 178 p. 2017.
- SILVEIRA, C. **Desaguamento de lodo de estações de tratamento de águas por leito de drenagem/secagem com manta geotêxtil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento). Universidade Estadual de Londrina, Paraná, 136 p., 2012.
- TOMINAGA, E. **Análise dos Procedimentos para Avaliação de Desempenho de Sistemas fechados com Geotêxtil para Desaguamento**. Dissertação (Mestrado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, 126 p., 2010.
- VERRELLI, D. I. **Drinking water treatment sludge production and dewaterability**. Tese (Doutorado em Engenharia) The University of Melbourne, 2008.
- WORLEY, J. W.; BASS, T. M; VENDRELL, P.F. Use of geotextile tubes with chemical amendments to dewater dairy lagoon solids. **Bioresource Technology** 99, 4451-4459, 2007.