



UNIVERSIDADE DE RIBEIRÃO PRETO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE DOUTORADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL

GIULLIANO GUIMARÃES SILVA

**EFICIÊNCIA DO DESAGUAMENTO DE RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA EM TUBO GEOTÊXTIL**

RIBEIRÃO PRETO
2019

GIULLIANO GUIMARÃES SILVA

**EFICIÊNCIA DO DESAGUAMENTO DE RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA EM TUBO GEOTÊXTIL**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto-UNAERP.

Orientadora: Profa. Dra. Angela Di Bernardo Dantas

Ribeirão Preto
2019

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Processamento
Técnico da Biblioteca Central da UNAERP

- Universidade de Ribeirão Preto -

Guimarães, Giulliano, 1980-
G963e Eficiência do desaguamento de resíduo de estação de tratamento
de água em tubo geotêxtil / Giulliano Guimarães. – Ribeirão Preto, 2019.
176 f.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Angela Di Bernardo Dantas.
Tese (doutorado) - Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP,
Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2019.

1. Resíduos de estação de tratamento de água. 2. Desaguamento. 3.
Tubo Geotêxtil. I. Título.

CDD 628

Giulliano Guimarães Silva
EFICIÊNCIA DO DESAGUAMENTO DE RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA EM TUBO GEOTÊXTIL”.

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor pelo programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto.

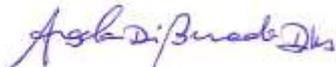
Orientadora: Profa. Dra. Angela Di Bernardo Dantas.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental

Data de defesa: 10 de maio de 2019

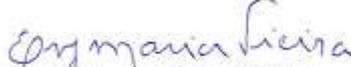
Resultado: aprovado

BANCA EXAMINADORA


 Profa. Dra. Angela Di Bernardo Dantas
 Presidente/UNAERP


 Profa. Dra. Emilia Kiyomi Kuroda
 UEL


 Profa. Dra. Luciana Rezende Alves De
 Oliveira
 UNAERP


 Profa. Dra. Eny Maria Vieira
 IQSC


 Prof. Dr. Murilo Daniel De Mello
 Innocentini
 UNAERP

Ribeirão Preto
 2019

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais José Pereira da Silva e Rosália Guimarães Silva pelo exemplo de vida, e a minha esposa querida Telma de Matos Guimarães e nossa filha Heloísa de Matos Guimarães, por toda dedicação e amor.

AGRADECIMENTOS

- Gratidão a Deus pela saúde e pela força em superar os obstáculos na realização desse trabalho, uma conquista tão especial em minha vida profissional. Sem Ele nada poderia ter acontecido;
- À minha esposa Telma de Matos Guimarães e nossa filha Heloísa de Matos Guimarães por terem me acompanhado todos os momentos de alegria e tristeza nesse período, superando juntos com amor, carinho, compreensão e companheirismo;
- Aos meus pais José Pereira da Silva e Rosália Guimarães Silva e os meus irmãos Luciano Guimarães Silva e Jane Sampaio de Oliveira e minha sobrinha Grazielle Sampaio de Oliveira pelas orações, carinho, apoio e incentivo;
- À Profa Dra. Angela Di Bernardo Dantas pela participação em todas as etapas dessa pesquisa, apontando alternativas e proporcionando condições adequadas ao desenvolvimento da Tese. Agradeço ainda pela amizade, apoio e confiança e oportunidade de aprendizado;
- Ao Professor Luiz Di Bernardo que participou da fase da elaboração do projeto de pesquisa, dos artigos e pelas contribuições valiosas da Tese;
- Hidrosan Engenharia por ter sediado as reuniões de orientações do Doutorado em São Carlos;
- À Coordenação do Doutorado a Profa. Luciana Rezende por todo carinho e apoio durante o curso;
- Aos professores que compuseram a Banca e pelas contribuições, especialmente à Profa. Emília Kuroda, Profa. Eny Vieira, Profa. Luciana Rezende e o Prof. Murillo Innocentini;
- Ao amigo e companheiro de luta o Professor Sérgio Carlos pela amizade, pelas alegrias, tristeza e pelos desafios que passamos juntos em todas as etapas do doutorado;
- Agradeço à Coordenação de Meio Ambiente do IFTO em especial os meus amigos Marcelo Mendes, Alice Rocha, Cláudia Rezende, Aline Constantin e Sylvia Setubal pelo apoio e pelas palavras de ânimo;
- A Claudia Rezende por ter viabilizado o curso de Planejamento Experimental em Palmas – TO;

- Agradeço o apoio que a gestão do IFTO Campus Palmas concedeu na pesquisa do Doutorado em especial os diretores do Campus Palmas Prof. Octaviano Sidinei e o Prof. Wendell Eduardo e a equipe administrativa Vladimir Lisboa, Kleryson Saraiva, Diogo Carvalho, Cleison Alves. Muito obrigado pela credibilidade e todo o esforço da instituição em ajudar nas atividades da pesquisa;
- Aos meus alunos de iniciação científica que foram dedicados e que não mediram esforços nos ensaios da pesquisa: Lucas Damasceno, Yitzhak Melo, Rodrigo Folha, Roberto Duarte e Laís Sá;
- Ao amigo José Carlos que ajudou na etapa final dos ensaios;
- Agradecer ao Presidente da BRK Ambiental/Saneatins Denis Lacerda, o Diretor operacional José Mário Ribeiro, o Gerente operacional de Palmas Eng^oRodrigo Lacerda, e o Supervisor operacional Eng^o Guilherme Silvestrim e o Eng^o Lucas Cherem por toda ajuda prestada durante a realização desse trabalho;
- Aos amigos do setor de Projetos da BRK Ambiental/Saneatins o Eng^o Ricardo Thomaz e o Eng^o Sebastião e a Eng^a Eliandra Barros (setor de planejamento) pelo apoio na fase inicial do convênio do IFTO e a Saneatins;
- Agradecer aos profissionais que trabalham na ETA 006 BRK Ambiental/Saneatins que foram atenciosos e disponíveis em ajudar: Biólogo Dr. José Roberto, as gerentes Prycylla e Adriana Natália Fonseca, e os técnicos: Rakel Lima, Rodrigo Silva, Edivaldo, Antônio da Costa, Francisco, Lígia, Jailson, Ederson, Neudes, Fábio, Aelson, Otávio, Agrinaldo, Lucas Romão e Carlos Henrique;
- Aos professores do curso de Doutorado em Tecnologia Ambiental da Unaerp que contribuíram com a minha formação acadêmica;
- A professora Dra. Cristina Paschoalato, por todo o apoio, carinho e disponibilidade de atender as demandas da pesquisa;
- As técnicas do Laboratório de Saneamento do IFTO Evanuzia Miranda e Ana Cristina por toda ajuda e disponibilidade em ajudar;
- O bolsista Matheus Guimarães do Laboratório de Recursos Hídricos da Unaerp por toda dedicação e companheirismo,
- Ao amigo Wesley Adonai pelas imagens aéreas realizadas da ETA 006;

- Aos irmãos da ICM em especial Pr. Oscar Nunes, Margarida, Socorro, Argileu, Marcos Bahia e Leidiane,
- Aos amigos Thiago Dias, Tatiana Wanderley, Jeverson Carlos, Ana Horner, Liliana Naval, Elaine Paz, Adriana Trajano, Michelle, Luciana de Paula, Hélen e Ana Lúcia Jardim pelo apoio e carinho;
- A Professora Maria Isabel Rodrigues por todo o carinho e ajuda no Planejamento Experimental da Pesquisa,
- Agradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro em forma de bolsa de estudo (Taxa Capes/Unaerp);
- A empresa Huesker em especial o Diretor Eng^o MSc. André Estêvão Silva e o MSc. Eng. Eduardo Guanaes (Departamento de Engenharia), por toda disponibilidade em ajudar na pesquisa e pelas confecções das bolsas utilizadas nos ensaios;
- A empresa SNF Floeger em especial o Eng^o Everton pela doação dos polímeros utilizados na pesquisa;
- Enfim, quero agradecer a Deus, aos meus amigos e familiares que participaram do meu dia a dia e que de uma forma ou de outra ajudaram na conclusão deste trabalho. Sem vocês não teria conseguido.... MUITO OBRIGADO!!!!

RESUMO

Nas últimas décadas, os tubos geotêxteis vêm sendo utilizados no desaguamento de diversos tipos de materiais com alto teor de umidade, como resíduo de mineração, resíduo de estação de tratamento de esgotos, sedimento contaminado de indústrias e efluentes de aterro sanitário. No Brasil as estações de tratamento de água (ETA) ainda não dispõem de mecanismos que garantam o destino correto dos resíduos gerados em seu processo de tratamento. Contudo, há poucos trabalhos científicos que abordem o tratamento do resíduo gerado em estações de tratamento de água utilizando a filtração em geotêxtil. Atualmente, existem muitas incertezas sobre os parâmetros de projeto que devem ser adotados e sobre qual a combinação de geotêxtil x condicionante químico que otimiza o desaguamento destes resíduos. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do processo de desaguamento do resíduo de estação de tratamento de água por filtração em tubo geotêxtil em escala de bancada e em escala-piloto. Neste trabalho foram executados ensaios de bancada para definição das melhores condições de dosagens dos condicionantes químicos e o tipo de geotêxtil. Posteriormente, foi construída e operada uma instalação-piloto de *bags* em tubo geotêxtil, variando-se o sólido suspenso total (SST) do resíduo, dosagem de polímero e taxa de filtração. Os resultados dos ensaios de bancada mostraram que o 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. Na instalação-piloto, os resultados de turbidez do filtrado considerado como parâmetro de desempenho de retenção, evidenciaram que a aplicação de dosagens de polímero acima de 1,7 mgPol/gSST de resíduos com SST entre 4 g/L e 16 g/L foi a condição favorável na redução da turbidez do filtrado. Resíduos com SST inicial de 0,25 g/L produziram os maiores valores de perda de partículas e baixa eficiência de filtração no desempenho de retenção, comparados com os resíduos com SST inicial acima de 10 g/L. Conseqüentemente os valores de Turbidez do Filtrado apresentaram valores acima de 90 uT. Tal efeito é justificado pela ausência da formação do *filter cake*. Contudo, os ensaios com teor SST no resíduo variando de 0,25 g/L a 20 g/L, com dosagem de polímero abaixo de 1,5 mgPol/gSST, revelaram ineficiência no sistema de desaguamento. Assim, à medida que os resultados de turbidez e perda de partícula (PP) aumentaram, a eficiência de filtração (EF) de filtração diminuiu. Os resíduos com SST de 0,25 g/L evidenciaram a necessidade de adensamento antes do desaguamento. Nos ensaios foram observadas a obtenção de 30% do teor de sólidos no interior do *bag*, com a combinação de polímero de 1,78 mgPol/gSST, SST acima de 8,6 g/L e taxa de aplicação inicial de 57 m³.m⁻².dia⁻¹. Com isso, o teor de sólidos no interior dos *bags* variou de 23,60% a 46,20%, considerado satisfatório para o sistema de desaguamento. Os resultados obtidos no planejamento experimental demonstram ser promissor o desaguamento de resíduos de ETA em tubo geotêxtil, desde que sejam realizados estudos em escala real para validação do comportamento das variáveis aqui apresentadas.

Palavras-chave: Resíduos de estação de tratamento de água. Desaguamento. Tubo Geotêxtil.

ABSTRACT

In the last decades, geotextiles have been used in the dewatering of various types of materials with high moisture content, such as mining residue, sewage treatment plant residue, contaminated sediment from industries and landfill effluent. In Brazil, water treatment plants (WTP) still do not have mechanisms to guarantee the correct destination of waste generated in their treatment process. However, there are few scientific studies that address the treatment of waste generated in water treatment plants using geotextile filtration. Currently, there are many uncertainties about the design parameters that must be adopted and about which combination of geotextile x chemical conditioner that optimizes the dewatering of these wastes. Therefore, the present work had as objective to evaluate the performance of the dewatering process of the water treatment plant residue by geotextile tube filtration in bench scale and pilot scale. In this work, bench tests were carried out to define the best conditions of the chemical conditioners and the type of geotextile. Subsequently, a pilot installation of geotextile tube bags was constructed and operated, with the total suspended solid (TSS), polymer dosage and filtration rate of the residue being varied. The results of the bench tests showed that the initial TSS of the residue and the chemical conditioning dosage, in this case the cationic polymer, exerted influence on the amount of material retained by the geotextile fabric and the time of dewatering. In the pilot installation, the filtrate turbidity results considered as a parameter of retention performance, showed that the application of polymer dosages above 1.7 mgPol/gTSS of TSS residuals between 4 g/L and 16 g/L was the favorable condition in reducing the turbidity of the filtrate. Residues with initial TSS of 0.25 g/L produced the highest values of particle loss and low filtration efficiency in the retention performance, compared to the residuals with initial TSS above 10 g/L. Consequently the filtrate turbidity values presented values above 90 uT. Such an effect is justified by the absence of filter cake formation. However, assays with TSS content at the residue ranging from 0.25 g/L to 20 g/L, with polymer dosage below 1.5 mgPol/gTSS, revealed inefficiency in the dewatering system. Thus, as the results of turbidity and particle loss (PP) increased, filtration efficiency (FE) decreased. The residuals with TSS of 0.25 g/L evidenced the need for densification before dewatering. In the tests, 30% of the solids content inside the bag was obtained, with a polymer combination of 1.78 mgPol/gTSS, TSS above 8.6 g/L and initial application rate of $57 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$. Thus, the solids content inside the bags ranged from 23.60% to 46.20%, considered satisfactory for the dewatering system. The results obtained in the experimental planning demonstrate the promising of the dewatering of WTP residues in a geotextile tube, as long as real scale studies are carried out to validate the behavior of the variables presented here.

Key words: Residues from water treatment station. Dewatering. Geotextile Tube.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: RESÍDUOS GERADOS EM ETA COM TRATAMENTO DE CICLO COMPLETO	30
FIGURA 2: FLUXOGRAMA DAS ALTERNATIVAS PARA TRATAMENTO DOS RESÍDUOS DE ETA DE CICLO COMPLETO COM REMOÇÃO HIDRÁULICA OU MECANIZADAS COM RESÍDUOS DE DECANTADORES ...	33
FIGURA 3: TECNOLOGIA DE DESAGUAMENTO DE RESÍDUO UTILIZANDO SISTEMA MECANIZADO	35
FIGURA 4: TECNOLOGIA DE DESAGUAMENTO DE RESÍDUO UTILIZANDO SISTEMA NATURAIS.....	36
FIGURA 5: CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS GEOSINTÉTICOS SEGUNDO A ISO 10318-1 (2015)	43
FIGURA 6: CLASSIFICAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS EM FUNÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	44
FIGURA 7: DETALHES DO DESAGUAMENTO EM TUBOS DE GEOTÊXTEIS: (A) VISTA FRONTAL; (B) VISTA LATERAL	49
FIGURA 8: ESQUEMA DE BLOQUEAMENTO.....	50
FIGURA 9: ESQUEMA DE CEGAMENTO	50
FIGURA 10: ESQUEMA DE COLMATAÇÃO	51
FIGURA 11: DISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE E FORMAÇÃO DO “ <i>FILTER CAKE</i> ”	52
FIGURA 12: ESQUEMA DAS ZONAS FORMADAS DURANTE O REENCHIMENTO DA BOLSA GEOTÊXTIL	56
FIGURA 13: FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA PESQUISA.....	63
FIGURA 14: COLETA DO “RESÍDUO MÃE”: TUBULAÇÃO DE DESCARGA DE RESÍDUO DO DECANTADOR I (1), DETALHE DO MANGOTE NA TUBULAÇÃO DE DESCARGA DO DECANTADOR (2), COLETA DO RESÍDUO NO RESERVATÓRIO DE 2000 L (3), RESÍDUO MÃE ARMAZENADO NO RESERVATÓRIO (4).....	67
FIGURA 15: PREPARO DO RESÍDUO DE ESTUDO: RESÍDUO ARMAZENADO NO RESERVATÓRIO (1), COLETA DE ÁGUA FILTRADA DA ETA 006 EM BOMBONAS PARA REALIZAR AS DILUIÇÕES (2), RESÍDUO DE ESTUDO PREPARADA (3)	68
FIGURA 16: PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS DE BANCADA.....	69
FIGURA 17: REPRESENTAÇÃO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 2 ² COM PONTO CENTRAL UTILIZADO SISTEMA DE FILTRAÇÃO DE BANCADA EM GEOTÊXTIL	69
FIGURA 18: 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)	71

FIGURA 19: ENSAIOS DE BANCADA EM GEOTÊXTIL: ADIÇÃO DE POLÍMERO NA MISTURA RÁPIDA (1), SISTEMA DE BANCADA DE FILTRAÇÃO EM GEOTÊXTIL (2) E DESAGUAMENTO DO RESÍDUO (3)	72
FIGURA 20: REPRESENTAÇÃO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL COM PONTO CENTRAL UTILIZADO NA INSTALAÇÃO-PILOTO DE DESAGUAMENTO EM TUBO GEOTÊXTIL (ETAPA IV) .	74
FIGURA 21: ESQUEMA DA INSTALAÇÃO-PILOTO DE DESAGUAMENTO EM TUBO GEOTÊXTIL	76
FIGURA 22: CAIXA COLETORA DO PERCOLADO: GRELHA PARA APOIAR O BAG (1), CAIXA COLETORA DE PERCOLADO (2) E DETALHES DA MONTAGEM (3 E 4).....	76
FIGURA 23: DETALHES DO CONJUNTO MOTO-BOMBA (1) E O SISTEMA DA INSTALAÇÃO-PILOTO DE DESAGUAMENTO (2).....	76
FIGURA 24: PREPARO DO RESÍDUO DE ESTUDO.....	77
FIGURA 25: DETALHES DA INSTALAÇÃO-PILOTO: CONJUNTO MOTO-BOMBA DE 2 CV (1), SISTEMA LIGA/DESLIGA E INVERSOR DE FREQUÊNCIA (2), CAIXA COLETORA E FITA COM INDICAÇÃO DA ALTURA MÁXIMA TUBO GEOTÊXTIL (3) .	78
FIGURA 26: LOCAL UTILIZADO PARA SECAGEM DOS BAGS DE GEOTÊXTIL, APÓS OS ENSAIOS NA INSTALAÇÃO- PILOTO	79
FIGURA 27: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ETA 006 DE PALMAS-TO	80
FIGURA 28: FOTO AÉREA DA ETA 006 DE PALMAS-TO	81
FIGURA 29: CAPTAÇÃO SUPERFICIAL DA ETA 006: BARRAGEM DE NÍVEL (1), TOMADA DE ÁGUA (2), GRADEAMENTO (3), CANAL DE TOMADA DE ÁGUA (4), CAIXA DE AREIA (5), ELEVATÓRIA DE ÁGUA BRUTA (6)	82
FIGURA 30: CAIXA DE CHEGADA DA ÁGUA BRUTA (1) E A TUBULAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE SUSPENSÃO DE CAL HIDRATADA (2)	83
FIGURA 31: VERTEDOR PASHALL (VISTA A JUSANTE)	84
FIGURA 32: UNIDADE DE FLOCULAÇÃO COM DOIS CONJUNTOS MECANIZADOS COM 4 CÂMARAS EM SÉRIE	85
FIGURA 33: UNIDADE DE DECANTAÇÃO: CANAL DE ENTRADA DE ÁGUA FLOCULADA NO DECANTADOR (1), CORTINA DISTRIBUIDORA (2), CALHAS DE COLETA DE ÁGUA DECANTADA (3), RASPADORA DE RESÍDUO (4), VISTA AÉREA DO DECANTADOR I E II (5) E TUBULAÇÃO DE DESCARGA DE L RESÍDUO (6).....	87
FIGURA 34: SISTEMA DE FILTRAÇÃO COM TAXA DECLINANTE VARIÁVEL: VISTA LATERAL DOS FILTROS (1), FILTROS EM OPERAÇÃO (2), CAIXA DE SAÍDA COM VERTEDOR (3), TUBULAÇÃO DE ÁGUA E DE AR (4).....	88

FIGURA 35 : ESQUEMA GERAL (1) E FOTO AÉREA DA ETR DA ETA 006 PALMAS/TO	89
FIGURA 36: POÇOS DE RESÍDUO DO TCALF.....	90
FIGURA 37: ENTRADA DAS DESCARGAS DOS DECANTADORES NO TRDD/SALF.....	90
FIGURA 38: BAG GEOTÊXTIL INSTALADO NO SISTEMA DE TRATAMENTO DOS RESÍDUOS DA ETA 006.....	91
FIGURA 39: PONTOS DE COLETAS DE RESÍDUO NO INTERIOR DO BAG DA ETA 006 PARA ANÁLISE DO TEOR DE SÓLIDOS.....	92
FIGURA 40: CURVA GRANULOMÉTRICA DO “RESÍDUO MÃE” COLETADO NO DECANTADOR DA ETA 006 NO PERÍODO DE 10 A 13 DE ABRIL DE 2018	93
FIGURA 41: MICROGRAFIAS OBTIDAS POR IMAGEM DE MICROSCOPIA DE VARREDURA ELETRÔNICA DO “RESÍDUO MÃE” COLETADO NO DECANTADOR DA ETA 006 NO PERÍODO DE 10 A 13 DE ABRIL DE 2018.....	94
FIGURA 42: ANÁLISE QUALITATIVA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS CONSTITUINTES NA PARTE SÓLIDA DO “RESÍDUO MÃE, USANDO O MÉTODO EDS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA	95
FIGURA 43: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA TURBIDEZ DO FILTRADO: (A) CAT-GT1 - POLÍMERO CATIONICO GT1, (B) CAT-GT2 - POLÍMERO CATIONICO 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.....	102
FIGURA 44: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO TEMPO DE DESAGUAMENTO: (A) CAT-GT1 - POLÍMERO CATIONICO GT1, (B) CAT-GT2 - POLÍMERO CATIONICO 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.....	104
FIGURA 45: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO TEOR DE SÓLIDOS NO INTERIOR DO BAG (A) E PD (B) EM FUNÇÃO DO SST DO RESÍDUO E DOSAGEM DE POLÍMERO PARA OS ENSAIOS NA INSTALAÇÃO-PILOTO	109
FIGURA 46: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO TEOR DE SÓLIDOS NO INTERIOR DO BAG EM FUNÇÃO DA DOSAGEM DE POLÍMERO E TAXA DE FILTRAÇÃO PARA OS ENSAIOS NA INSTALAÇÃO-PILOTO....	111
FIGURA 47: PRECIPITAÇÃO MÉDIA (MM) E TEMPERATURA MÁXIMA E MÍNIMA NA CIDADE DE PALMAS EM 2018.....	112
FIGURA 48: CURVA DE SECAGEM DOS ENSAIOS 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16 E 17: VALORES RELATIVOS À QUANTIDADE DE TEOR DE SÓLIDOS RETIDO NO INTERIOR DO BAG EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	113

FIGURA 49: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA TURBIDEZ DO FILTRADO (A), PERDA DE PARTÍCULAS PP (B) E EFICIÊNCIA DE FILTRAÇÃO EF (C) EM FUNÇÃO DO SST DO RESÍDUO INICIAL E DOSAGEM DE POLÍMERO PARA OS ENSAIOS NA INSTALAÇÃO-PILOTO	119
FIGURA 50: CURVA DE CONTORNO PARA TURBIDEZ DO FILTRADO (A), PP (B) E EF (C) EM FUNÇÃO DO SST INICIAL DO RESÍDUO E TAXA DE FILTRAÇÃO PARA OS ENSAIOS NA INSTALAÇÃO-PILOTO	121
FIGURA 51: CURVA DE CONTORNO PARA TURBIDEZ (A), PP (B) E EF (C) EM FUNÇÃO DA DOSAGEM DE POLÍMERO E TAXA DE FILTRAÇÃO PARA OS ENSAIOS NA INSTALAÇÃO-PILOTO DE DESAGUAMENTO EM TUBO GEOTÊXTIL.....	122
FIGURA 52: TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO OBTIDOS NOS ENSAIOS 3 E 7 NA INSTALAÇÃO-PILOTO.....	124
FIGURA 53: TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO OBTIDOS NOS ENSAIOS 4 E 8 NA INSTALAÇÃO-PILOTO.....	126
FIGURA 54: TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO OBTIDOS NOS ENSAIOS 14 E 16 NA INSTALAÇÃO-PILOTO.....	127
FIGURA 55: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 1 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 0,25 G/L	161
FIGURA 56: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 2 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 20 G/L	161
FIGURA 57: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 3 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 0,25 G/L	162
FIGURA 58: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 4 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 20 G/L	162
FIGURA 59: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 5 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 0,25 G/L	163
FIGURA 60: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 6 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 20 G/L	163

FIGURA 61: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 7 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 0,25 G/L	164
FIGURA 62: – RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 8 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 20 G/L	164
FIGURA 63: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 9 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 0,25 G/L	165
FIGURA 64: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 10 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 20 G/L	165
FIGURA 65: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 11 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 10,13 G/L	166
FIGURA 66: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 12 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 10,13 G/L	166
FIGURA 67: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 13 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 10,13 G/L	167
FIGURA 68: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 14 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 10,13 G/L	167
FIGURA 69: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 15 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 10,13 G/L	168
FIGURA 70: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 16 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 10,13 G/L	168
FIGURA 71: RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA TURBIDEZ DO FILTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO NO ENSAIO 17 COM REABASTECIMENTOS COM RESÍDUO COM TEOR DE SST DE 10,13 G/L	169

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: VALORES DE TEOR DE SÓLIDOS PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS DE DESAGUAMENTO	40
TABELA 2: RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES E AS FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS (ADAPTADO DE LOPES, 1998) (CONTINUA).....	47
TABELA 3: EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	64
TABELA 4: PARÂMETROS, MÉTODOS E LIMITES DE MEDIÇÃO	65
TABELA 5: PRODUTOS QUÍMICOS UTILIZADOS COMO COAGULANTES E CONDICIONANTES QUÍMICOS	65
TABELA 6: PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS GEOTÊXTEIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS	66
TABELA 7: NÍVEIS DOS FATORES EMPREGADOS NO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 2 ³ COM PONTO CENTRAL OU DELINEAMENTO COMPOSTO DE FACES CENTRADAS (DCFC) NOS ENSAIOS DE BANCADA EM GEOTÊXTIL	69
TABELA 8: DELINEAMENTO DE FACE CENTRADA (DFC) NOS ENSAIOS DE BANCADA EM GEOTÊXTIL	70
TABELA 9: TAXA DE FILTRAÇÃO UTILIZADA NOS ENSAIOS DA INSTALAÇÃO PILOTO	74
TABELA 10: NÍVEIS DOS FATORES EMPREGADOS NO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 2 ³ COM PONTO CENTRAL OU DELINEAMENTO DE FACES CENTRADAS (DFC), NA INSTALAÇÃO PILOTO..	74
TABELA 11: ENSAIOS REALIZADOS NO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 2 ³ DURANTE IPDG NA ETAPA IV.....	75
TABELA 12: CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICA E BIOLÓGICA DA ÁGUA BRUTA DO RIBEIRÃO TAQUARUÇU NO PERÍODO DE 10 A 13 DE ABRIL DE 2018	82
TABELA 13: VAZÃO (L/s) NA ETA 006 NO PERÍODO DE 10 A 13 DE ABRIL DE 2018	84
TABELA 14: CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA ETA 006 (TURBIDEZ, DOSAGEM E pH DE COAGULAÇÃO) NO PERÍODO DE 10 A 13 DE ABRIL DE 2018	84
TABELA 15: SÓLIDOS SUSPENSO TOTAL NAS DESCARGAS DOS DECANTADORES I E II.....	86
TABELA 16: TEOR DE UMIDADE COLETADO NO INTERIOR DO <i>BAG</i> DA ETA 006	92
TABELA 17: VOLUME DE RESÍDUOS DE ESTUDO PREPARADO A PARTIR DO RESÍDUO MÃE.....	92
TABELA 18: CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICA DOS RESÍDUOS DE ESTUDO.....	93
TABELA 19: DELINEAMENTO COMPOSTO DE FACE CENTRADA E TRÉPLICAS NOS PONTOS CENTRAIS EM VALORES CODIFICADOS E VALORES REAIS (ENTRE PARÊNTESES) E RESPOSTAS OBSERVADAS	

PARA O GT1 E GT2 (TURBIDEZ DO FILTRADO E TEMPO DE DESAGUAMENTO) COM O POLÍMERO CATIONICO.....	96
TABELA 20: DELINEAMENTO COMPOSTO DE FACE CENTRADA E TRÉPLICAS NOS PONTOS CENTRAIS EM VALORES CODIFICADOS E VALORES REAIS (ENTRE PARÊNTESES) E RESPOSTAS OBSERVADAS PARA O GT1 E GT2 (TURBIDEZ DO FILTRADO E TEMPO DE DESAGUAMENTO) COM O POLÍMERO ANIÔNICO (CONTINUA).....	96
TABELA 21: DELINEAMENTO COMPOSTO DE FACE CENTRADA E TRÉPLICAS NOS PONTOS CENTRAIS EM VALORES CODIFICADOS E VALORES REAIS (ENTRE PARÊNTESES) E RESPOSTAS OBSERVADAS PARA O GT1 E GT2 (TURBIDEZ DO FILTRADO E TEMPO DE DESAGUAMENTO) COM POLÍMERO NÃO-IÔNICO	97
TABELA 22: COEFICIENTE DE REGRESSÃO E DESVIO PADRÃO DAS RESPOSTAS OBSERVADAS PARA GT1 E GT2 (TURBIDEZ DO FILTRADO E TEMPO DE DESAGUAMENTO) COM POLÍMERO CATIONICO	98
TABELA 23: COEFICIENTE DE REGRESSÃO E DESVIO PADRÃO DAS RESPOSTAS OBSERVADAS PARA GT1 E GT2 (TURBIDEZ DO FILTRADO E TEMPO DE DESAGUAMENTO) COM POLÍMERO ANIÔNICO	99
TABELA 24: COEFICIENTE DE REGRESSÃO E DESVIO PADRÃO DAS RESPOSTAS OBSERVADAS PARA GT1 E GT2 (TURBIDEZ DO FILTRADO E TEMPO DE DESAGUAMENTO) COM POLÍMERO NÃO-IÔNICO	100
TABELA 25: ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA) DA TURBIDEZ DO FILTRADO E TEMPO DE DESAGUAMENTO.....	101
TABELA 26: DELINEAMENTO COMPOSTO DE FACES CENTRADAS E TRÉPLICAS NOS PONTOS CENTRAIS COM OS ENSAIOS EM VALORES CODIFICADOS E VALORES REAIS (ENTRE PARÊNTESES) E RESPOSTAS OBTIDAS DOS PARÂMETROS DE DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO-PILOTO	106
TABELA 27: COEFICIENTE DE REGRESSÃO ESTIMADOS PARA RESPOSTA DE TEOR DE SÓLIDOS NO INTERIOR DO BAG E PORCENTAGEM DE DESAGUAMENTO NOS ENSAIOS DA INSTALAÇÃO-PILOTO	107
TABELA 28: ANOVA PARA RESPOSTA DE TEOR DE SÓLIDOS NO INTERIOR DO BAG (%) E PD (%) NOS ENSAIOS DA INSTALAÇÃO-PILOTO	109
TABELA 29: DELINEAMENTO COMPOSTO DE FACE CENTRADA E TRÉPLICAS NOS PONTOS CENTRAIS EM VALORES CODIFICADOS E VALORES REAIS (ENTRE PARÊNTESES) DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE RETENÇÃO NA INSTALAÇÃO-PILOTO (CONTINUA).....	115

TABELA 30: COEFICIENTE DE REGRESSÃO E DESVIO PADRÃO PARA RESPOSTA DE TURBIDEZ DO FILTRADO, EFICIÊNCIA DE FILTRAÇÃO (EF) E PERDA DE PARTÍCULAS (PP)	116
TABELA 31: ANOVA PARA RESPOSTA DE TURBIDEZ DO FILTRADO, EFICIÊNCIA DE FILTRAÇÃO (EF) E PERDA DE PARTÍCULAS (PP) (CONTINUA).....	118
TABELA 32: TURBIDEZ DO FILTRADO, CICLOS DE ENCHIMENTO E VOLUME BOMBEADO OBTIDOS NOS ENSAIOS DA INSTALAÇÃO-PILOTO COM SST DO RESÍDUO INICIAL 0,25 G/L	123
TABELA 33: TURBIDEZ DO FILTRADO, CICLOS DE ENCHIMENTO E VOLUME BOMBEADO OBTIDOS NOS ENSAIOS DA INSTALAÇÃO-PILOTO COM SST DO RESÍDUO INICIAL 20 G/L	126
TABELA 34: TURBIDEZ DO FILTRADO, CICLOS DE ENCHIMENTO E VOLUME BOMBEADO OBTIDOS NOS ENSAIOS DA INSTALAÇÃO-PILOTO COM SST DO RESÍDUO INICIAL 10,12 G/L	127
TABELA 35: ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA) DA TURBIDEZ DO FILTRADO E TEMPO DE DESAGUAMENTO COM GT2 E POLÍMERO CATIÔNICO	142
TABELA 36: ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA) DA TURBIDEZ DO FILTRADO E TEMPO DE DESAGUAMENTO COM GT1 E POLÍMERO ANIÔNICO	142
TABELA 37: ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA) DA TURBIDEZ DO FILTRADO E TEMPO DE DESAGUAMENTO COM GT2 E POLÍMERO ANIÔNICO	143
TABELA 38: ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA) DA TURBIDEZ DO FILTRADO E TEMPO DE DESAGUAMENTO COM GT1 E NÃO-IÔNICO.....	143
TABELA 39: ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA) DA TURBIDEZ DO FILTRADO E TEMPO DE DESAGUAMENTO COM GT2 E NÃO-IÔNICO.....	144
TABELA 40: RESULTADOS DO ENSAIO 01 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	146
TABELA 41: RESULTADOS DO ENSAIO 02 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	148
TABELA 42: RESULTADOS DO ENSAIO 03 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	149
TABELA 43: RESULTADOS DO ENSAIO 04 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	150
TABELA 44: RESULTADOS DO ENSAIO 05 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	150
TABELA 45: RESULTADOS DO ENSAIO 06 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	151
TABELA 46: RESULTADOS DO ENSAIO 07 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	152
TABELA 47: RESULTADOS DO ENSAIO 08 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	152
TABELA 48: RESULTADOS DO ENSAIO 09 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	153
TABELA 49: RESULTADOS DO ENSAIO 10 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	154
TABELA 50: RESULTADOS DO ENSAIO 11 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	155
TABELA 51: RESULTADOS DO ENSAIO 12 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	155
TABELA 52: RESULTADOS DO ENSAIO 13 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	156

TABELA 53: RESULTADOS DO ENSAIO 14 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	156
TABELA 54: RESULTADOS DO ENSAIO 15 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	157
TABELA 55: RESULTADOS DO ENSAIO 16 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	158
TABELA 56: RESULTADOS DO ENSAIO 17 DO DESAGUAMENTO NA INSTALAÇÃO PILOTO	159

LISTA DE QUADRO

QUADRO 1: VANTAGEM E DESVANTAGENS DO MÉTODO DE SECAGEM MECANIZADA	36
QUADRO 2: VANTAGEM E DESVANTAGENS DO MÉTODO DE SECAGEM NATURAL.....	37
QUADRO 3: VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS PRINCIPAIS TÉCNICAS DE DESAGUAMENTO UTILIZADOS NO TRATAMENTO DOS RESÍDUOS (CONTINUA).....	38
QUADRO 4: RESUMO SOBRE O DESENVOLVIMENTO DOS MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS AO LONGO DO TEMPO E SUAS ÁREAS DE APLICAÇÕES (CONTINUA).....	42
QUADRO 5: FUNÇÃO DOS MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS SEGUNDO A ISO 10318-1 (2015) (CONTINUA).....	44
QUADRO 6: RELAÇÃO DOS PRINCIPAIS FATORES QUE AFETAM O CONDICIONAMENTO DO RESÍDUO	53
QUADRO 7: RESUMO DOS CONDICIONANTES QUÍMICOS MAIS UTILIZADOS	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
2 OBJETIVOS	27
2.1 OBJETIVO GERAL	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3 REVISÃO DE LITERATURA	28
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	28
3.2. RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	28
3.2.1 Origem dos Resíduos	28
3.3 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DOS RESÍDUOS DE ETA	31
3.3.1 Concepção dos Sistemas de Tratamento dos Resíduos de ETA.....	31
3.3.3 Desaguamento de Resíduo de ETA.....	35
3.4 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS	41
3.5 DESAGUAMENTO DE RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA POR MEIO DE TUBOS GEOTÊXTEIS.....	47
3.6 FORMAÇÃO DO “ <i>FILTER CAKE</i> ”	51
3.7 PESQUISA DESENVOLVIDAS SOBRE TUBO GEOTÊXTIL PARA DESAGUAMENTO	54
4 MATERIAL E MÉTODOS	63
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	63
4.2 EQUIPAMENTOS, PRODUTOS QUÍMICOS E MÉTODOS ANALÍTICOS.....	64
4.3 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DA ETA 006	66
4.3.1 Caracterização do Sistema de Tratamento de Água e do Sistema de Tratamento dos Resíduos da ETA 006.....	66
4.4 ETAPA II: COLETA, PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA ETA 006	67
4.4.1 Coleta do Resíduo da ETA 006	67
4.4.2 Caracterização do Resíduo da ETA 006.....	67
4.4.3 PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ESTUDO.....	68
4.5 ETAPA III: ENSAIOS DE BANCADA EM GEOTÊXTIL	68
4.5.1 Planejamento Experimental dos Ensaios de Bancada em Geotêxtil.....	68
4.5.2 Montagem do Sistema de Filtração de Bancada em Geotêxtil.....	70
4.5.3 Ensaios de Bancada em Geotêxtil	71

4.6 ETAPA IV: ENSAIOS NA INSTALAÇÃO-PILOTO DE DESAGUAMENTO EM TUBO GEOTÊXTIL	73
4.6.1 Planejamento Experimental da Instalação-Piloto de Desaguamento em Tubo Geotêxtil	73
4.6.2 Montagem da instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil.....	75
4.6.3 Operação da instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil.....	77
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
5.1 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DA ETA 006	80
5.1.1 Caracterização do sistema de tratamento de água da ETA.....	80
5.1.1.1 Captação de Água Bruta	81
5.1.1.2 Caixa de chegada de água bruta	83
5.1.1.3 Mistura rápida.....	83
5.1.1.4 Unidade de floculação	85
5.1.1.5 Unidade de decantação	86
5.1.1.6 Unidade de filtração.....	87
5.1.2 SISTEMA DE TRATAMENTO DOS RESÍDUOS NA ETA 006	89
5.2 ETAPA II: PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA ETA 006.....	92
5.2.1 Preparo e Caracterização dos Resíduos de Estudo	92
5.3 ETAPA III ENSAIOS DE BANCADA EM GEOTÊXTIL	96
5.3.1 Resultados do Delineamento Composto de Faces Centradas 2^2 (DCFC) nos Ensaios de Bancada com Geotêxtil.....	96
5.4 ETAPA IV: ENSAIOS NA INSTALAÇÃO-PILOTO DE DESAGUAMENTO EM TUBO GEOTÊXTIL	105
5.4.1 Análise dos Parâmetros de Desempenho de Desaguamento.....	106
5.4.1.1 Teor de sólidos no interior do <i>bag</i> e porcentagem de desaguamento (PD).....	106
5.4.1.2 Curva de secagem.....	111
5.4.2 Análise dos Parâmetros de Desempenho de Retenção	115
5.4.2.1 Turbidez do filtrado, perda de partículas (PP) e eficiência de filtração (EF).....	115
5.4.2.2 Análise da turbidez do filtrado, ciclos de enchimento e volume bombeado nos ensaios da instalação-piloto.....	123
6 CONCLUSÕES.....	129
7 TRABALHOS FUTUROS	131
REFERÊNCIAS.....	132

APÊNDICE A.....	141
APÊNDICE B.....	145
APÊNDICE C.....	160
ANEXO A	170
ANEXO B	173

LISTA DE SIGLAS

ALF	Água de Lavagem dos Filtros
ANOVA	Análise de Variância
ANI	Aniônico
APHA	American Public Health Association
AWWA	<i>American Water Works Association</i>
CAT	Catiônico
DD	Descarga do Decantador
DCFC	Delineamento Composto de Face Centrada
EF	Eficiência de Filtração
ED	Eficiência de Desaguamento
ETA	Estações de Tratamento de Água
GT	Geotêxtil
IPDG	Instalação Piloto Desaguamento em Geotêxtil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NIO	Não-Iônico
PD	Porcentagem de Desaguamento
PP	Perda de Partícula
pH	Potencial Hidrogeniônico
Pol	Polímero
RE	Resíduo de Estudo
SST	Sólidos Suspenso Total
TCALF	Tanque de Recepção das Descargas dos Decantadores
TAR	Tanque de Água Recuperada
uT	Unidade de Turbidez
USEPA	United States Environmental Protection Agency

1 INTRODUÇÃO

Dentre os impactos que os resíduos de estação de tratamento de água podem causar em um corpo de água, estão a deterioração da qualidade de água pela adição de sólidos e microrganismos removidos previamente no tratamento de água, alterações da biota aquática, redução do volume útil do corpo de água devido ao assoreamento e possíveis efeitos tóxicos aos seres humanos e animais (ASCE & AWWA, 1996; REALI, 1999; ANDREOLI, 2001; GUIMARÃES *et al* 2014; DI BERNARDO *et al*, 2017).

No Brasil, o tratamento dos resíduos gerados nas estações de tratamento de água (ETA) ainda é incipiente. As Leis 9.433/97 Política Nacional de Recursos Hídricos e 9.605 / 98 – Crimes Ambientais, trazem em seus conteúdos critérios relacionados à gestão dos resíduos de ETA, uma vez que consideram o lançamento de resíduos *in natura* crime ambiental.

Di Bernardo *et al.* (2017) relatam que o tratamento dos resíduos de estação de tratamento de água consiste basicamente na separação sólido-líquido via clarificação/adensamento e desaguamento/secagem. O desaguamento do resíduo adensado é uma operação na qual se procura aumentar o teor de sólidos suspenso total (SST), com conseqüente redução do volume do resíduo a ser disposto. As tecnologias de desaguamento de resíduos mais utilizadas são os sistemas mecanizados (centrífuga, filtro prensa de esteira, filtro prensa de placas, prensa desaguadora tipo parafuso etc.), naturais (lagoa de lodo) e por filtração em leito de secagem, leito de drenagem, e em tecido especial (geotêxtil).

Para Fowler *et al.* (2002), Lawson (2008), Moo-Young *et al.* (2002), Moo-Young e Tucker (2002), Muthukumaran e Ilamparuthi (2006), Satyamurthy e Bhatia (2009), o emprego de geotêxteis em sistemas de desaguamento de resíduos ou rejeitos com alto teor de líquido em relação ao teor de sólidos, como resíduos gerados em decantadores e lavagem dos filtros de ETA, resíduos de processos de mineração, dentre outros distintos processos, tem aumentado nas últimas décadas. Tal fato se dá por tratar-se de uma solução eficiente e viável dos pontos de vista técnico, econômico e ambiental. Os sistemas fechados de geotêxteis possibilitam o desaguamento da fase líquida e o confinamento da fase sólida do resíduo, surgindo como uma contribuição quanto à problemática de desaguamento desses resíduos.

O método de desaguamento em sistemas pressurizados em geotêxtil consiste em utilizar bolsas ou tubos de geotêxteis, com capacidade de encapsular e reter grande parte da fração sólida do resíduo. A técnica consiste em eliminar o excesso de água do resíduo, através da drenagem do líquido pelos pequenos poros do geotêxtil, ocorrendo desaguamento progressivo e redução do

volume original. (FOWLER *et al.*, 1997; MOO-YOUNG *et al.*, 2002; MUTHUKUMARAN e ILAMPARUTHI, 2006).

É importante considerar que a capacidade de retenção e a permeabilidade do sistema estejam em equilíbrio para garantir a eficiência do desaguamento. O processo de desaguamento em tubos geotêxteis pode ser influenciado por diversos fatores, como as características do resíduo a ser desaguado, como o teor de sólidos suspensos totais (SST) do resíduo, abertura dos poros e permeabilidade do geotêxtil (LIAO e BHATIA, 2006; MUTHUKUMARAN e ILAMPARUTHI, 2006; CASTRO *et al.*, 2009; SATYAMURTHY e BHATIA, 2009).

Outro fator importante a ser considerado no desaguamento em tubo geotêxtil é a influência do uso do condicionamento químico no processo final na qualidade do efluente. Satyamurthy e Bhatia (2009) relatam que a introdução de produtos químicos, podem por exemplo, melhorar a qualidade do filtrado ou ainda, reduzir o tempo de desaguamento, diminuir a resistência à filtração, e aplicação de maiores dosagens de condicionantes químicos tendem a melhorar a qualidade do efluente; porém, considerando os custos elevados de aquisição dos produtos, é necessário otimizar o tipo e a dosagem desses produtos químicos.

Nas últimas décadas, intensificaram-se pesquisas no desenvolvimento de diferentes processos e técnicas para o tratamento dos resíduos de ETA. Contudo, há poucos trabalhos científicos que abordam sobre o tratamento do resíduo gerado em estações de tratamento de água utilizando a filtração em geotêxtil. Atualmente, existem muitas incertezas sobre os parâmetros de projeto que devem ser adotados e sobre qual a combinação de geotêxtil x condicionante químico que otimiza o desaguamento.

A principal contribuição científica da presente pesquisa foi levantar parâmetros de projetos para sistema de tratamento de resíduo de ETA em tubo geotêxtil. Dentre os principais parâmetros destacam-se: sólido suspenso total mínimo do resíduo a ser desaguado, taxa de filtração aplicada em geotêxtil, tipo de geotêxtil e estimativa do teor de sólidos final do resíduo desaguado. A obtenção de tais parâmetros de projeto torna-se relevante, sendo possível avaliar a necessidade ou não da etapa de adensamento, geralmente custosa em termos de implantação (adensadores por gravidade/flotação) e/ou operação (equipamentos mecanizados).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do processo de desaguamento do resíduo de estação de tratamento de água por filtração em tubo geotêxtil em escala de bancada e em escala piloto, considerando variações no teor de sólidos suspensos totais do resíduo, condicionante químico, além da gramatura e taxa de filtração.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- montar o sistema de filtração de bancada em geotêxtil e da instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil;
- investigar a influência dos condicionantes químicos polímeros sintéticos catiônico, não iônico, aniônico na eficiência do desaguamento do resíduo de ETA em dois tipos de geotêxtil em ensaios de bancada;
- investigar a influência de SST no resíduo a ser desaguado em dois tipos de geotêxtil em ensaios de bancada;
- investigar a influência de SST no resíduo a ser desaguado nos ensaios na instalação-piloto;
- avaliar na instalação piloto os tempos máximo e mínimo de secagem (curva de secagem) em função de SST no resíduo após o desaguamento;
- avaliar, por meio da ferramenta estatística DOE (*design of experiments*), o desaguamento do resíduo de ETA nos ensaios de bancada e na instalação-piloto, identificando o nível de influência dos fatores: de SST no resíduo, dosagem dos condicionantes químicos e taxa de filtração.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As ETA são projetadas para produzir água que atenda o padrão de potabilidade, utilizando, para isso, processos e operações com a introdução de produtos químicos, gerando resíduos. Estes resíduos têm origem nos decantadores, na lavagem dos filtros e na lavagem dos tanques de preparação de soluções e suspensões de produtos químicos (CORDEIRO, 2001). Ou seja, uma ETA utiliza água bruta como matéria prima, produtos químicos e energia para gerar um produto que é a água tratada e, em contrapartida, produz resíduos (DI BERNARDO *et al.*, 2012).

A indústria da água tem questionado, cada dia mais, a preservação da água bruta captada, através de ações que lhe garanta a proteção dos mananciais, e, por outro lado, lança seus resíduos no corpo d'água mais próximos, sem se preocupar com os efeitos impactantes no meio ambiente, o que mostra certa incoerência dos gestores. Apesar da Legislação Brasileira exigir que os resíduos de ETA sejam tratados antes de ser lançados nos cursos de água ou no solo, é fácil observar a falta de conscientização dos responsáveis pelo abastecimento de água quanto à necessidade urgente relacionado ao tratamento e à disposição adequada desses resíduos (CORDEIRO, 2001; DI BERNARDO *et al.*, 2017)

Para Di Bernardo *et al.*, (2012), o lançamento de resíduos de estações de tratamento de água indiscriminados diretos ou diretamente nos corpos de água causam: i) aumento da quantidade e da diversidade de organismos patogênicos, ii) acréscimo da concentração de compostos orgânicos tóxicos removidos ou formados no tratamento, iii) incremento da concentração de metais tóxicos no sedimento e no meio líquido; iv) limitação da luminosidade do meio líquido devido ao aumento do SST, o que afeta a reprodutibilidade da biota em geral; v) limitação ou até mesmo impedimento do uso do corpo receptor como fonte de dessedentação de animais ou como manancial de abastecimento de comunidades localizadas a jusante.

3.2. RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

3.2.1 Origem dos Resíduos

Ribeiro (2003) fala que o tratamento da água bruta gera benefícios sociais, mas como toda indústria de transformação, os processos e operações utilizados podem gerar impactos no ambiente.

Conforme ASCE e AWWA (1996), os resíduos de ETA podem ser divididos em quatro categorias: i) resíduo gerado na descarga dos decantadores, removidos em flotores, na lavagem de filtros, no abrandamento e na remoção de ferro e manganês da água bruta, ii) concentrado salino: resultante do tratamento de água por técnicas de membrana, osmose reversa, eletrodialise e troca iônica; iii) carvão ativado e resinas de troca iônica desgastadas e material filtrante usado; iv) emissões gasosas de unidade de controle de odor ou de técnicas de *air stripping*. Segundo Di Bernardo e Sabogal (2008), os resíduos gerados na lavagem dos filtros e descarga dos decantadores (ou flotores) são os mais representativos.

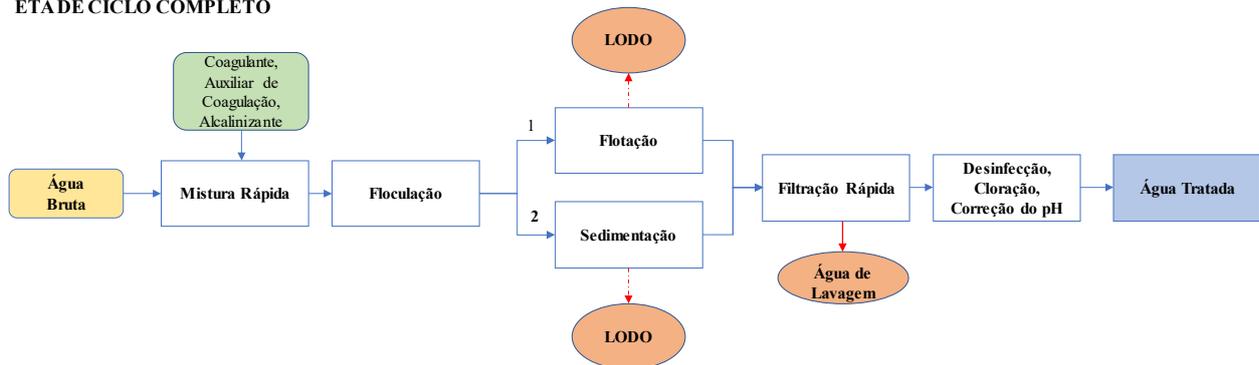
Em termos volumétricos, a maior quantidade de resíduos é proveniente das lavagens dos filtros. No entanto, em termos mássicos, a maior quantidade de resíduo é gerada no sistema de separação sólidos/líquido que, em uma estação de ciclo completo, é basicamente efetuada nos decantadores (ou flotores). Valores indicados na literatura exemplificam essa afirmação: enquanto a água de lavagem possui concentrações de sólidos entre 50 e 400 mg/L - representando entre 2 e 5% do volume processado na estação (WOLFE *et al.*, 1996), a operação de descarga em decantadores gera um resíduo bem mais concentrado, entre 500 e 30.000 mg/L – correspondente a uma fração entre 0,1 e 0,3% do volume produzido pela estação de tratamento de água (USEPA, 2002 e GUIMARÃES, 2007).

Cada linha geradora de resíduos apresenta características distintas em termos de vazão e de sólidos, razão pela qual, diferentes concepções de tratamento devem ser consideradas. Outras atividades desenvolvidas na estação, tais como as lavagens de tanques de preparação de suspensões e soluções de produtos químicos também contribuem para a quantidade total dos resíduos produzidos.

Os fluxogramas de unidades típicas de tratamento de água com coagulação química são apresentados na Figura 1, onde são indicadas também as operações responsáveis pela geração dos resíduos de maior relevância.

Figura 1: Resíduos gerados em ETA com tratamento de ciclo completo

ETA DE CICLO COMPLETO



Fonte: (Adaptado de Guimarães, 2007 e Di Bernardo *et al.*, 2017)

Conforme Di Bernardo e Sabogal (2008) e Di Bernardo *et al.* (2017), a quantidade e a qualidade dos resíduos produzidos em uma ETA depende de vários fatores destacando-se:

- qualidade da água bruta e da tecnologia de tratamento;
- características da coagulação: tipo e dosagem de coagulante e de alcalinizante ou de acidificante;
- uso, característica e dosagem do auxiliar de coagulação (floculação ou filtração);
- uso de oxidante e adsorvente (carvão ativado pulverizado);
- método de limpeza dos decantadores (ou flotadores)
- técnica de lavagem dos filtros;
- habilidades dos operadores;
- automação de processos e operações na ETA,
- reúso da água recuperada no sistema de tratamento.

De acordo com Cordeiro (2002), a caracterização dos resíduos pode ser realizada conforme a sua importância e objetivo do estudo, assim:

- Aspectos ambientais associados à disposição dos resíduos: pH, sólidos, metais, DQO, biodegradabilidade, toxicidade, pesticidas, fertilizantes e compostos orgânicos voláteis;
- Aspectos geotécnicos relacionados à remoção de água e a futuras utilizações dos sólidos dos resíduos: tamanho e distribuição de tamanho das partículas, limite de plasticidade e de liquidez, resistência específica, respostas ao aquecimento e resfriamento e sedimentabilidade.

A quantidade e qualidade dos resíduos em ETA existentes, podem ser obtidas por meio do monitoramento do funcionamento das diferentes unidades de tratamento, por um período que cubra as variações da qualidade da água bruta durante todas as estações climáticas de um ano.

3.3 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DOS RESÍDUOS DE ETA

Di Bernardo *et al* (2012) relatam a necessidade de projetistas entenderem o funcionamento das unidades, enfatizando o tempo de funcionamento diário, as vazões de água tratada durante o período diário de funcionamento, as características da água bruta, dosagem de produto químico, etc.

Em seguida, é preciso levantar os dados de operação das unidades que geram resíduos, especialmente filtros e decantadores ou flotores

- Filtros: tipo de meio filtrante, taxa de filtração, método de controle (taxa constante ou declinante, nível de água variável ou constante no interior dos filtros), tipo de lavagem (água, ar e água simultaneamente ou separadamente), frequência de lavagem, duração da lavagem, vazão utilizada, expansão promovida no meio filtrante, volume de água usado em cada lavagem, coleta amostras da água de lavagem de pelo menos dois filtros durante o tempo de lavagem, preparação de uma amostra composta e medição de suas características (SST, turbidez, COT, etc.);
- Decantadores: tipo e número de decantadores (convencional ou de alta taxa), taxa de escoamento superficial, características da água floculada e decantada, eficiência de remoção de flocos, vazão afluyente a cada decantador, descarga hidráulica ou mecanizada (se mecanizada, dados do equipamento, tais como vazão, tempo de funcionamento por dia etc.), frequência de descarga, frequência de limpeza manual em decantadores sem removedor de lodo (duração da limpeza, vazão de mangueiras e, se possível, vazões mínima e máxima de descarga etc.), coleta de amostras durante a limpeza relacionadas com a vazão de descarga, preparação de uma amostra composta e medição de suas características (SST, DQO, DBO₅ etc.).

3.3.1 Concepção dos Sistemas de Tratamento dos Resíduos de ETA

Para Fontana (2004), a escolha da tecnologia a ser empregada depende de um cuidadoso processo de verificação das condições operacionais das estações, características dos resíduos e condições regionais e locais. Principalmente para os meios naturais de desaguamento, as condições locais quanto à disponibilidade de área e clima são de grande importância.

O adensamento é uma das operações unitárias mais importantes do processo de tratamento da fase sólida, pois, de um modo geral, os equipamentos de desaguamento mecânico existentes no mercado recomendam um teor de sólidos no resíduo de entrada superior a 2% (20

g/L de SST) para que o seu funcionamento ocorra de forma adequada e econômica (Ferreira Filho e Além Sobrinho, 1998). Esse processo, cuja finalidade principal é a remoção do máximo de água possível antes do desaguamento final, usualmente é realizado por decantação ou por flotação e produz um resíduo concentrado, com conseqüente redução de volume pela remoção da água (Richter, 2001). Qualquer que seja a concepção do sistema de adensamento, é fundamental que o resíduo seja pré-condicionado com polímero, cujas dosagens situam-se normalmente entre 0,5 a 6,0 gramas de polímero por quilo de sólidos secos (g/kg).

Devido às diferenças significativas das características quantitativas e qualitativas dos resíduos de ETA, gerados por diferentes tecnologias de tratamento de água, a concepção dos sistemas de tratamento dos resíduos pode diferir consideravelmente (DI BERNARDO *et al.*, 2012).

Em relação ao tratamento dos resíduos, IE, (2008) e Di Bernardo *et al* (2012) consta os seguintes pontos:

i) é necessário conhecer melhor as características do resíduo (micro e macro propriedade) para projetar as unidades de adensamento, condicionamento e desaguamento;

ii) o projeto e construção das novas ETA devem contemplar as unidades de tratamento de resíduo;

iii) é necessário mudar a antiga concepção de projetos de ETA, de forma a priorizar a remoção mecanizada de resíduo dos decantadores em detrimento do manual;

iv) recomenda-se adaptar os decantadores existentes, para mecanizar a remoção de resíduo;

v) há necessidade de obtenção de parâmetros de projeto das unidades de desaguamento, que sejam mais adequados para as ETA nas condições brasileiras;

vi) recomenda-se o monitoramento da qualidade das águas de recirculação das unidades de tratamento de resíduo com relação à acrilamida e protozoários emergentes;

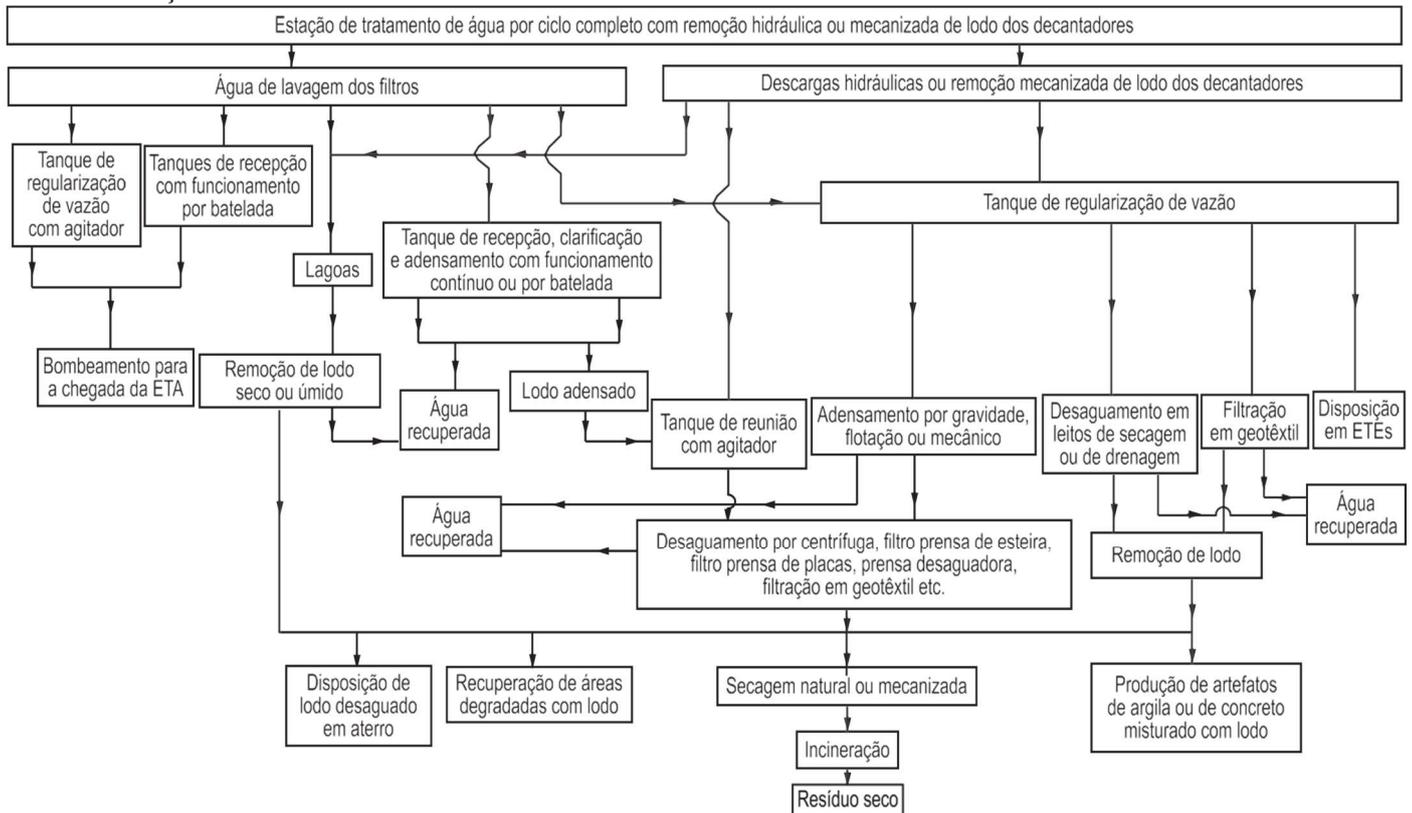
vii) para ETA de pequeno e médio portes, é preciso lembrar a existência de uma tecnologia simples e adequada;

viii) recomenda-se que as ETA monitorem o funcionamento dos decantadores/flotadores e filtros, em termos de vazão e SST para a determinação da quantidade de resíduo gerada (para substituir o uso de equações empíricas) e de suas características, por um período que cubra as variações da qualidade da água bruta. Essas informações devem ser disponibilizadas para subsidiar o projeto das unidades de tratamento dos resíduos;

ix) as operações e processos unitários da ETA devem ser otimizados, não apenas para melhorar a qualidade da água distribuída para a população, mas, também, para gerar menores quantidades de resíduos.

A Figura 3 mostra o fluxograma das alternativas para tratamento dos resíduos de ETA de ciclo completo com remoção hidráulica ou mecanizadas com resíduos de decantadores.

Figura 2: Fluxograma das alternativas para tratamento dos resíduos de ETA de ciclo completo com remoção hidráulica ou mecanizadas com resíduos de decantadores



Fonte: (Di Bernardo *et al.*, 2012)

As alternativas mostradas na Figura 2 incluem a água de lavagem dos filtros e os volumes das descargas hidráulicas ou mecanizada dos decantadores, sendo a qualidade da água bruta o parâmetro responsável pela frequência com que serão realizadas as descargas. O SST na água de lavagem dos filtros raramente excede 500 mg/L e a do resíduo dos decantadores pode variar de 2 a 10 g/L nas descargas hidráulicas e de 5 a 20 g/L nas descargas da remoção mecanizada. Com base em ensaios realizados em equipamento de jarteste ou em coluna de sedimentação para amostras de água bruta representativas de diferentes épocas do ano (DI BERNARDO *et al.*, 2011), a massa de SST gerada diariamente pode ser estimada em função de SST na água coagulada; fixada aos valores de SST no resíduo, é obtido o volume ocupado nos poços de resíduo (no caso de descarga hidráulica) ou sedimentado no fundo do decantador (nos decantadores com removedores), resultando a frequência com que as descargas hidráulicas serão realizadas ou o número de vezes de funcionamento dos equipamentos de remoção de resíduo.

Existe ETA de ciclo completo que possuem tanques de recepção da água de lavagem dos filtros (com funcionamento contínuo com agitador ou por batelada), em que esse resíduo é simplesmente recirculado para a câmara de chegada de água bruta. Tendo em vista que os filtros constituem a principal barreira sanitária, essa prática não é recomendada pelos autores, pelo fato de a água de lavagem dos filtros possuir grande quantidade de microrganismos, alguns muito resistentes à ação de pré-oxidantes comumente usados nas ETA.

Considerando que água de lavagem de filtro (ALF) represente a água de lavagem de filtros e os resíduos de descarga de decantadores, as alternativas apresentadas no fluxograma da Figura 5 podem ser resumidas da seguinte forma, conforme Di Bernardo *et al.*, (2012):

- Encaminhamento da ALF e da descarga de decantador (DD) para lagoas: o resíduo seco ou úmido removido por ocasião da limpeza de uma lagoa pode ser enviado a aterro específico, para recuperação de áreas degradadas, para secagem natural ou mecanizada ou para instalações de produção de artefatos de cimento e areia ou de argila (blocos de cimento, guias de sarjeta, blocos cerâmicos, tijolos, telhas etc.);

- Recepção, clarificação e adensamento da ALF: a água clarificada é conduzida para a câmara de chegada de água bruta da ETA e o sedimento encaminhado para um tanque provido de agitador, onde é reunido com as DD; dependendo do SST na mistura, esse resíduo pode ser desaguado em centrífugas, filtro prensa de placas, filtro prensa de esteira, prensa desaguadora, filtração em geotêxtil etc.; a água recuperada pode ser recirculada para a câmara de chegada da ETA; o resíduo desaguado pode ser enviado para aterro específico, para recuperação de áreas degradadas, para secagem natural ou mecanizada ou para instalações de produção de artefatos de cimento e areia ou de argila (blocos de cimento, guias de sarjeta, blocos cerâmicos, tijolos, telhas etc.);

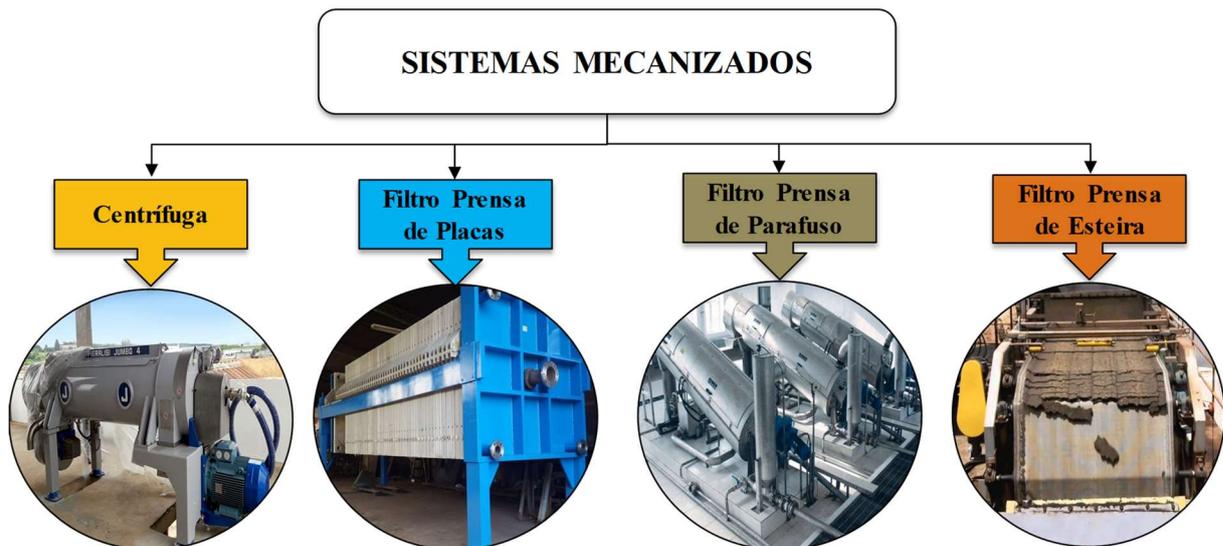
- Tanque de recepção provido de agitador para regularização de vazão da ALF e DD: desse tanque, os resíduos podem: i) ser adensados em unidades por gravidade ou por flotação ou em unidades mecânicas, resultando lodo adensado e água; a água pode ser recirculada para a câmara de chegada da ETA e o lodo adensado ser desaguado em centrífugas, filtro prensa de placas, filtro prensa de esteira, prensa desaguadora, filtrado em geotêxtil etc.; a água recuperada pode retornar à câmara de chegada de água bruta da ETA, enquanto o resíduo desaguado pode ser disposto em aterro especial, ser usado para a recuperação de áreas degradadas, ser secado (natural ou mecanicamente) e incinerado ou ser usado para a produção de artefatos de cimento e de argila (fabricação de blocos de cimento, guias de sarjeta, telhas, tijolos, blocos cerâmicos etc.); ii) ser desaguados em leitos de secagem ou de drenagem ou ser filtrados em geotêxtil, resultando água recuperada e resíduo, o qual pode ter os mesmos destinos indicados em (i); iii) ser dispostos

em ETEs.

3.3.3 Desaguamento de Resíduo de ETA

Para Di Bernardo *et al.* (2012), o desaguamento de resíduo é uma operação na qual se procura aumentar o teor de SST, com a conseqüente redução do volume de resíduo a ser disposto. O desaguamento de resíduo pode ser efetuado por meio de sistemas mecanizados (centrífugas, filtros prensa de esteira, filtro prensa de placas, prensa desaguadora tipo parafuso), naturais (lagoa de lodo) e por filtração em leito de secagem, leito de drenagem e sistemas fechados de geotêxteis, conforme Figuras 4 e 5. Cada técnica de desaguamento possui suas peculiaridades, vantagens e desvantagens e, por isso, os projetistas devem estar atentos para os custos de implantação, operação e manutenção. Com qualquer técnica de desaguamento é desejável a obtenção de torta de resíduo com teor de SST superior a 20% (massa/massa).

Figura 3: Tecnologia de desaguamento de resíduo utilizando sistema mecanizado



Fonte: Autor, 2019.

Figura 4: Tecnologia de desaguamento de resíduo utilizando sistema naturais

Fonte: Autor, 2019.

Richter (2001) relata que entre os diversos equipamentos de desaguamento mecânico disponíveis atualmente no mercado, podem ser citados, em ordem crescente de custo, prensa desaguadora, centrífuga, filtro prensa e filtro rotativo a vácuo.

Segundo Libânio (2016) as tecnologias mecanizadas utilizam para o desaguamento uma combinação da sedimentação gravitacional e filtração. Geralmente são indicados para estações com menor disponibilidade de área e que tem como objetivo atingir um maior teor de sólidos. No Quadro, os autores Di Bernardo e Dantas (2005) mostram um resumo das vantagens e desvantagens do método de secagem mecanizada dos resíduos gerados em ETA.

Quadro 1: Vantagem e desvantagens do método de secagem mecanizada

Métodos de Desaguado Mecanizado	
Vantagens	Desvantagens
i) Possibilita diminuir os custos de transporte do resíduo até o destino; ii) Incrementa as potencialidades do emprego do resíduo como cobertura para aterros e matéria-prima em algumas empresas da construção; iii) A técnica independe das características climáticas da região para seu funcionamento; iv) Requer menores áreas de implantação.	i) Requer energia elétrica e pessoal qualificado para operar e manter o sistema; ii) Pode gerar gases tóxicos no processo, os quais devem ser controlados; iii) O resíduo precisa ser desaguado antes de ser tratado no secador; iv) Apresenta grande investimento inicial e custos elevados de operação e manutenção.

Fonte: (Adaptado de Di Bernardo e Dantas, 2005)

Estudos mostraram que o Brasil reúne condições favoráveis de espaço e recursos naturais que quando aliadas ao baixo custo de instalação e operação, indicam potencial vantagem na adoção de sistemas naturais para o tratamento de resíduos de ETA (ACHON *et al.*, 2008; DI BERNARDO *et al.*, 2011).

O desaguamento natural utiliza apenas agentes naturais, como a gravidade e a evaporação. Esses métodos apresentam como desvantagem a necessidade de grandes áreas para instalação e dependem diretamente das condições climáticas. Por necessitar de grandes áreas para instalação são mais indicados para ETA de pequeno porte, onde a geração de resíduos é menor. O Quadro 2 mostra um resumo das vantagens e desvantagens do método de secagem natural dos resíduos gerados em ETA.

Quadro 2: Vantagem e desvantagens do método de secagem natural

Métodos de Secagem Natural	
Vantagens	Desvantagens
i) Possibilita diminuir os custos de transporte do resíduo até o destino; ii) Incrementa as potencialidades do emprego do resíduo como cobertura para aterros e matéria-prima em algumas empresas da construção; iii) Baixo custo de energia elétrica; iv) Em condições climáticas favoráveis, a secagem dos resíduos resulta eficiente; não há necessidade de pessoal altamente qualificado para operação e manutenção.	i) Exige grandes áreas de implantação; ii) O resíduo precisa ser desaguado antes de ser encaminhado ao secador; iii) O projeto requer conhecimento das condições climáticas da região; iv) Há necessidade de máquinas para revolver o resíduo periodicamente; v) A técnica ainda não foi totalmente desenvolvida (falta de parâmetros de projeto e operação).

Fonte: (Adaptado de Di Bernardo e Dantas, 2005)

Cada técnica de desaguamento possui suas peculiaridades, vantagens e desvantagens e, por isso, devem ser avaliadas conforme seu desempenho e seus gastos com investimento e funcionamento para selecionar a melhor alternativa. Em qualquer caso, no desaguamento, recomenda-se que a torta obtenha SST superior a 200 g/L ou teor de SST maior que 20% em massa/massa (DI BERNARDO e SABOGAL, 2008).

O Quadro 3 mostra as vantagens e desvantagens das principais técnicas de desaguamento utilizados no tratamento dos resíduos conforme Di Bernardo e Sabogal, (2008).

Quadro 3: Vantagens e desvantagens das principais técnicas de desaguamento utilizados no tratamento dos resíduos (continua)

CENTRIFUGAÇÃO	
Vantagens	Desvantagens
i) O método é adequado para ETA com limitações de espaço; ii) Não depende das condições meteorológicas da região, iii) o desaguamento é realizado em poucos minutos.	i) pode ocorrer abrasão do tambor; ii) a unidade requer lavagem de água das partes em contato direto com o resíduo; iii) requer unidade de adensamentos; iv) o método é sensível quando existe variação de vazão e das características do resíduos; v) pode apresentar problemas de barulho e vibrações durante a operação; vi) alto custo de energia elétrica e alto custo com implantação e operação; vii) não se recomenda para ETA de pequeno porte.
FILTRO PRENSA DE ESTEIRA	
Vantagens	Desvantagens
i) O método é adequado para ETA com limitações de espaço; ii) tem baixo custo de energia; iii) o sistema é recomendado para resíduo proveniente do abrandamento da água; iv) Não depende das condições meteorológicas da região; v) o desaguamento é realizado em poucos minutos.	i) o método é sensível as características do resíduo; ii) as correias do equipamento pode deteriora-se rapidamente na presença de material abrasivo; iii) os rolamentos estão sujeitas a falhas; iv) o aumento da tensão no filtro prensa incrementa o teor de sólidos, embora reduz a vida útil do equipamento; v) precisa de energia elétrica e de pessoal qualificado para operação e manutenção; vi) requer lavagem frequente dos tecidos filtrantes e dos equipamentos; vii) problemas de desalinhamentos das telas, causando descontinuidade operacional; viii) alto custo com implantação e operação.
FILTRO PRENSA DE PLACAS	
Vantagens	Desvantagens
Aplicam-se as vantagens i, iv e v dos filtros prensa de esteiras.	i) o resíduo necessita de condicionamento prévio, com o intuito de reduzir a resistência específica e o coeficiente de compressibilidade; ii) a eficiência da técnica é muito sensível às variações das característica do resíduo; iii) o resíduo pode aderir-se à placa, o que dificulta sua descarga e diminui o escoamento do filtrado; iv) as placas podem fissurar-se ou romper-se por pressão desigual na câmara; v) a troca o meio filtrante pode ser demorada e frequente. Vi) Aplicam-se as desvantagens v, vi e viii dos filtros prensa de esteiras
FILTRO PRENSA DE PLACAS PARAFUSO	
Vantagens	Desvantagens
Aplicam-se as vantagens i, iv e v dos filtros prensa de esteiras.	i) consumo elevado de energia elétrica e necessidade de pessoal qualificado para operação e manutenção; ii) necessidades de altas dosagens de polímero; iii) o meio filtrante requer lavagem frequentes; iv) o sistema apresenta baixa eficiência em resíduo de coagulação da água, embora possa apresentar melhores resultados no tratamento de resíduos gerados a partir do abrandamento da água bruta.

Fonte: (Adaptado de Sabogal Paz, 2007)

Quadro 3: Vantagens e desvantagens das principais técnicas de desaguamento utilizados no tratamento dos resíduos (continua)

LAGOAS DE LODO	
Vantagens	Desvantagens
i) Não tem consumo de energia elétrica; ii) não requer pessoal qualificado para operação e manutenção; iii) o número de limpezas por ano é reduzido comparado aos leitos de secagem ou de drenagem; iv) as lagoas têm baixa sensibilidade às variações quantitativas e qualitativas do resíduo.	i) O projeto de lagoas requer o conhecimento das condições climáticas e do solo da região; ii) As lagoas, dependendo da profundidade e do teor de SST, podem apresentar longos períodos de desaguamento; iii) o tempo de desaguamento é maior, comparados com leitos de secagem; iv) as unidades exigem maiores áreas de implantação.
LEITO DE DRENAGEM	
Vantagens	Desvantagens
i) Baixo investimento inicial; ii) não requer pessoal qualificado para operação e manutenção; iii) Não tem consumo de energia elétrica e nem de produto químico; iv) permite a recuperação de água clarificada; v) podem gerar uma alta concentrações de sólidos se as característica climáticas da região for favorável; vi) são indicados para ETA de pequeno porte; vii) as unidade tem baixa sensibilidade às variações quantitativas e qualitativas do resíduo; viii) a remoção de água livre é mais eficiente comparada com lagoas de lodo; ix) as unidades apresenta pouca tendência de entupimento do leito; x) os leitos podem produzir resíduos com menor umidade.	i) os leitos necessitam de maior área de implantação, comparados aos métodos mecânicos; ii) O resíduo não pode ser armazenado indefinidamente no leito, deve ser removido para um local apropriado. Essa remoção pode exigir intenso trabalho; iii) o tratamento de resíduos com concentrações altas de matéria orgânica poderia precisar de estabilização antes do desaguamento; iv) o projeto requer o conhecimento do clima da região.
LEITO DE SECAGEM	
Vantagens	Desvantagens
i) Aplicam-se as vantagens de i a viii dos leitos de drenagem.	i) A unidade apresenta problemas de entupimento do material filtrante; ii) Aplicam-se todas as desvantagens dos leitos de drenagem.

Fonte: (Adaptado de Sabogal Paz, 2007)

Silveira *et al.*, (2015) avaliaram a eficiência da técnica natural de desaguamento utilizando sistema drenagem/secagem, com manta geotêxtil, dos resíduos de decantadores de duas diferentes estações de tratamento de água, em ensaios de laboratório e escala reduzida. Na fase de drenagem, entre 78 a 91% do volume total dos líquidos percolados apresentaram qualidade compatível com o padrão de enquadramento dos corpos de água doce classes I e II, segundo a Resolução 357/05 do Conama. Na fase de secagem, foi possível obter teores de sólidos totais entre 15,9 e 20,3%, cujos valores são da mesma ordem de grandeza que aqueles obtidos por desaguamentos mecânicos, mesmo em condições críticas de secagem.

Os sistemas mecânicos envolvem altos custos de aquisição, manutenção, além de consumir energia e produtos químicos, já os sistemas naturais apresentam como restrições a necessidade de grandes áreas e depende das condições climáticas. Uma questão primordial na

escolha da tecnologia de desaguamento, que conseqüentemente impacta na destinação final do resíduo, é o teor de sólidos mínimo para o resíduo ser encaminhado a etapa de desaguamento. Dependendo da situação da ETA, há necessidade de se ter uma etapa anterior, de adensamento, para elevar o teor de sólidos no líquido. A Tabela 1 apresenta alguns valores recomendados pela literatura/fabricantes das tecnologias de desaguamento, para os teores de sólidos mínimo na entrada do sistema, e o teor de sólidos.

Tabela 1: Valores de teor de sólidos para diferentes tecnologias de desaguamento

Tecnologia de Desaguamento	Teor de sólidos mínimo antes do tratamento (%)	Teor de sólidos após o Tratamento (%)
Centrífuga	2 % (Di Bernardo <i>et al.</i> , 2012)	20-30% (Cornwell, 1987)
Filtro prensa de esteiras	1-5 % (Di Bernardo <i>et al.</i> , 2012)	20-25% (Cornwell, 1987)
Leitos de secagem	-	30-40% (Silveira, 2012)
Lagoa	-	7-15% (Cornwell, 1987)
Tubo Geotêxtil	1 % (Di Bernardo <i>et al.</i> , 2017)	20-30% (Guimaraes <i>et al.</i> , 2014)

Fonte: Autor, 2019.

Grzelak (2011) relata que há uma década, o desaguamento de resíduo foi realizado quase que exclusivamente com lagoas, filtro prensa e centrífugas. As desvantagens auxiliares indesejáveis desses sistemas (tempo de desidratação, capacidade limitada, altos custos) criaram uma oportunidade para o desenvolvimento de novas tecnologias de baixa drenagem e de baixa manutenção. No final dos anos 90, os tubos geotêxteis foram utilizados pela primeira vez para desaguar resíduos de estação de tratamento de esgoto (FOWLER *et al.*, 1996). A desidratação do resíduo por tubo geotêxtil é um processo no qual um material de pasta fluida (lama/resíduo) é bombeado para um tubo ou série de tubos para reduzir o teor de água. O geotêxtil deve ser permeável o suficiente para permitir que a água escorra rapidamente, mas deve fazê-lo sem perda excessiva de partículas finas e contaminantes. Ao contrário de outras tecnologias, os tubos geotêxteis podem ser fabricados em tamanhos específicos do local e são projetados para acomodar as necessidades de uma determinada operação de desidratação. Os tubos também são simples de transportar e usar, e são significativamente mais econômicos do que outros sistemas (LAWSON, 2008).

Avancini (2017) relata em seu trabalho que nas últimas décadas, novas tecnologias de desaguamento natural vêm sendo estudadas. Dentre elas o desaguamento do resíduo confinado

em sistemas filtrantes fabricados em geotêxtil. Fowler *et al.* (1997) relataram as primeiras práticas envolvendo geotêxteis, permeáveis, para o tratamento e/ou disposição de resíduos com alto teor de umidade, em diversos países, como Alemanha, Estados Unidos, Brasil e França, nas décadas de 80 e 90.

Fowler *et al.*, (1995) e Avancini (2017) relatam as primeiras experiências de utilização de sistemas fechados em geotêxtil especificamente para o desaguamento de material contaminado no Porto de Oakland, nos Estados Unidos, estado da Califórnia. Na ocasião, material contaminado de dragagem foi bombeado hidráulicamente em um tubo em geotêxtil permeável, permitindo a drenagem e redução de volume entre 40 a 65 % do volume original e posterior disposição final em aterro.

Para os autores FOWLER *et al.*, (1995); FOWLER *et al.*, (1997); FOWLER *et al.*, (2002) e Avancini (2017) as bolsas ou tubos em geotêxteis oferecem algumas vantagens, como fácil instalação, boa relação custo-benefício, confiabilidade, baixo custo de operação e manutenção, não necessitando de mão de obra constante, capacidade de aumentar o teor de sólidos em um curto período de tempo, baixo impacto ambiental e principalmente a grande capacidade de retenção dos finos contidos no lodo. Foi demonstrado que este sistema é capaz de reter quase 100 % dos sólidos, impedindo assim, também a passagem dos contaminantes. Além disto, o fato de ser um sistema fechado e a característica hidrofóbica dos fios faz com que a penetração de águas pluviais seja considerada geralmente pouco relevante. Vanzetto (2012) indica que, dentre as técnicas de desaguamento de resíduos naturais, esta é uma das técnicas com menor susceptibilidade ao clima.

3.4 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS

A ISO TS 13434 (2008) descreve os geossintéticos como materiais versáteis que surgiram como alternativa tecnológica, especialmente nos âmbitos geotécnicos. Sendo muitas vezes aplicados em substituição, parcial ou total, a recursos naturais como cascalho, areia e argila, dentre outros (SHUKLA e YIN, 2006; MOREIRA, 2017).

Segundo a ISO 10318-1, (2015) os geossintéticos podem desempenhar diversas funções (primárias ou secundárias) em obras geotécnicas. As principais funções em que esses elementos são empregados são:

- Filtração: retenção do solo ou de outras partículas sujeitas a forças hidrodinâmicas, permitindo a passagem do fluido através do geossintético;

- Drenagem: coleta e transporte de um fluido ao longo do plano de um geossintéticos;
- Barreira para controle de fluxo: prevenção, limitação ou desvio do fluxo;
- Reforço: melhoria do comportamento mecânico de uma estrutura geotécnica;
- Proteção: prevenção ou limitação de danos a outros elementos ou materiais pelo uso de um geossintético;
- Controle de erosão superficial: prevenção ou limitação da movimentação do solo ou de outras partículas de uma superfície;
- Separação: prevenir a mistura de diferentes materiais adjacentes;
- Alívio de tensões: retardar o desenvolvimento de trincas em camadas de asfalto, utilizando um produto geossintéticos para absorver as tensões do pavimento danificado.

No Quadro 4 os autores Shukla e Yin (2006) e Moreira (2017) descrevem os principais pontos do desenvolvimento dos geossintéticos ao longo do tempo, tal como de suas áreas de aplicações.

Quadro 4: Resumo sobre o desenvolvimento dos materiais geossintéticos ao longo do tempo e suas áreas de aplicações (continua)

Primeiras Décadas	<ul style="list-style-type: none"> • Em 1926 o departamento de estrada da Carolina do Sul (<i>South Carolina Highway Department</i>) fez uso de tecidos visando o reforço de estradas (Beckham e Mills, 1935); • Entretanto, os polímeros que hoje compõem a maior parte dos geossintéticos só passaram a ser produzidos para comercialização 30 anos depois.
Final dos anos 50	<ul style="list-style-type: none"> • No final dos anos 50 uma gama variada de tecidos foi produzida objetivando servir como separadores e camadas de filtro em solos; • Os tecidos, hoje chamados de geotêxteis, foram usados em projetos na costa da Holanda e dos EUA, com função de filtragem.
Década de 1960	<ul style="list-style-type: none"> • Na França, a então chamada Rhone-Poulenc Textiles, deu início a diversas aplicações usando geotêxteis não tecidos agulhados; • Foi também quando surgiu o uso de geotêxteis em leitos de vias férreas e rodoviárias.
Década de 1970	<ul style="list-style-type: none"> • Em 1970, aconteceu a primeira aplicação de geotêxteis em barragens; • Na mesma década os geotêxteis foram incorporados para uso como reforço em, por exemplo, muros de contenções e declives íngremes; • Foi dado início ao processo de desenvolvimento da padronização desses materiais com a criação de uma norma que articulava, principalmente, a formação de um comitê sobre geossintéticos; • A primeira conferência sobre geossintéticos foi realizada em 1977, em Paris.

Fonte: (Adaptado de Shukla e Yin, 2006; Moreira, 2017)

Quadro 4: Resumo desenvolvimento dos materiais geossintéticos ao longo do tempo e suas áreas de aplicações

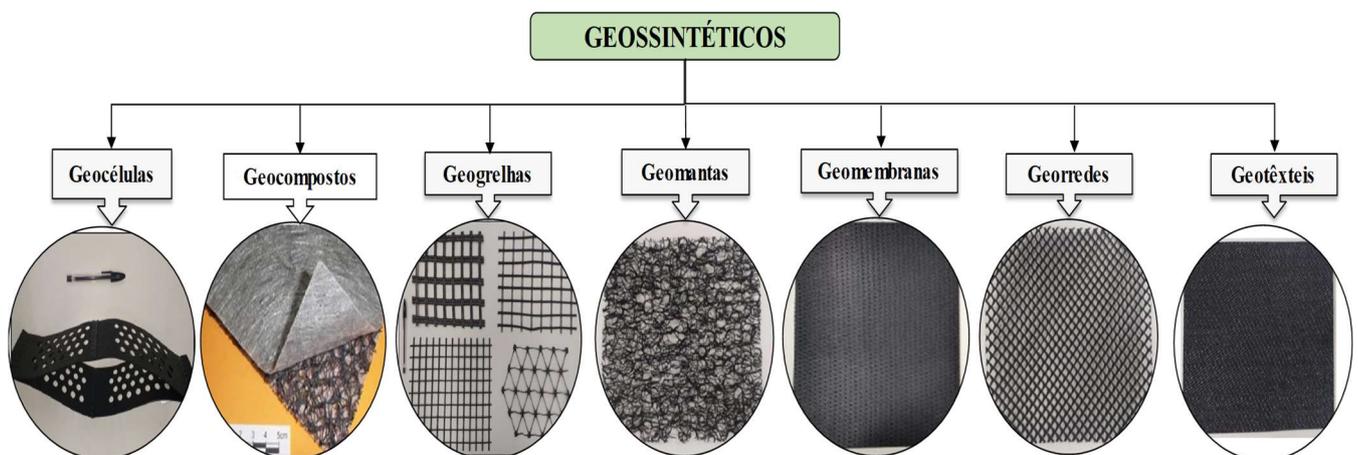
(continua)

<p>Década de 1980</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Deu-se início ao uso de geossintéticos para contenção de resíduos prejudiciais ao meio ambiente; • Os sistemas de confinamento de solo por geotêxteis foi desenvolvido na França, em 1980; • A primeira aplicação de destaque foi na detecção de um vazamento de resíduos líquidos em Hopewell, Virgínia, em 1984; • O primeiro livro sobre geossintéticos foi escrito em 1980, por Koerner e Welsh; • Em 1983, foi criada a International Geosynthetic Society; • Em 1984 foi publicado o primeiro volume da revista internacional intitulada Geotextiles and Geomembranes.
<p>Década de 1990</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Época em que foram publicadas muitas normas relacionadas aos geossintéticos, por organizações como: American Society for Testing and Materials (ASTM), EUA; International Organization for Standardization (ISO), Suíça; British Standards Institution (BSI), Reino Unido; Bureau of Indian Standards (BIS), Índia; • Em 1995, foi publicada a Geosynthetic International, segunda revista internacional da área.

Fonte: (Adaptado de Shukla e Yin, 2006; Moreira, 2017)

Segundo a ISO 10318-1, (2015); Guanaes (2009) e Moreira (2017), os geossintéticos é o termo usado para nomear materiais que tem ao menos um de seus componentes produzido a partir de um polímero sintético ou natural. Podem ter origem em diferentes polímeros, com variadas características, em função do uso pretendido e do desempenho esperado. Recebem distintas classificações: geotêxteis, geogrelha, georrede, geomanta, geocélula, geotira, geoespaçador, barreira sintética (polimérica, argilosa, betuminosa) e geocomposto. Pode-se descrever a divisão dos Geossintéticos (ver Figura 6), como:

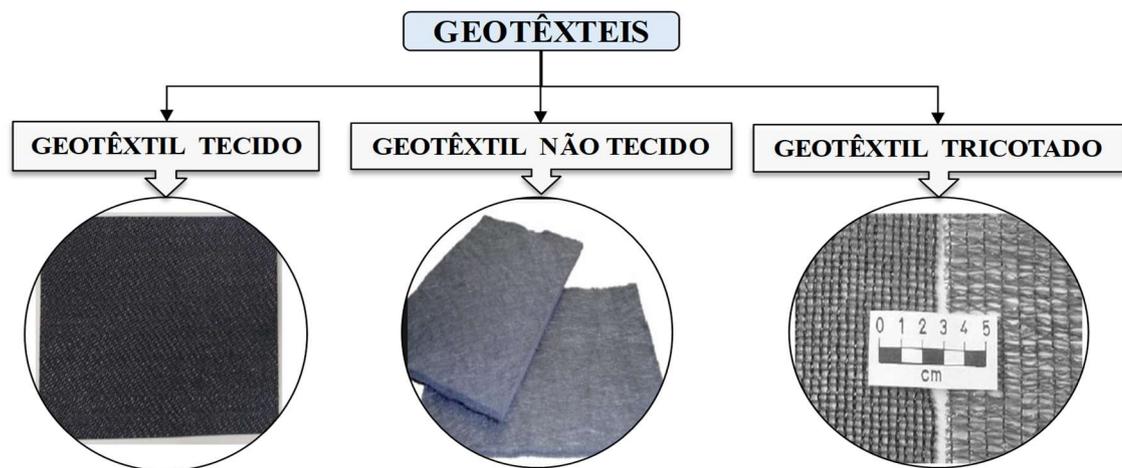
Figura 5: Classificação dos materiais geossintéticos segundo a ISO 10318-1 (2015)



Fonte: (Adaptado de Moreira, 2017; ISO 10318-1, 2015)

De acordo com Carneiro (2009), ISO 10318-1 (2015), Moreira (2017) e Guanaes (2009) os Geotêxteis são materiais poliméricos, têxteis, planos e permeáveis. Dividem-se em geotêxteis tecidos, não tecidos e tricotados, em função do processo de fabricação (Figura 5). Desempenham funções como proteção, reforço, separação, filtragem ou drenagem. Pode-se descrever a divisão dos Geotêxteis (Figura 6), como:

Figura 6: Classificação dos Geotêxteis em função do processo de fabricação



Fonte: (Adaptado de Moreira, 2017; ISO 10318-1, 2015)

O Quadro 5 mostra um resumo dos materiais geossintéticos e suas funções conforme ISO 10318-1 (2015), Moreira (2017), Urashima (1996) e Guanaes (2009).

Quadro 5: Função dos materiais geossintéticos segundo a ISO 10318-1 (2015) (Continua)

Função	Descrição	Classificação	Exemplo
Filtração	Realiza passagem livre de fluido com retenção de partículas sólidas	Geotêxteis	Desempenham funções como proteção, reforço, separação, filtragem ou drenagem (ver Figura 8).
Drenagem	Permite o transporte de fluidos pelo seu corpo	Geocompostos, geoespaçadores e o geotubos	Sistemas drenantes (canais e trincheiras)
Separação	Impede contato ou interação entre materiais adjacentes	Geotêxteis e Geomembranas	Sistemas viários, ambientais, barreiras de sedimentos.
Reforço	Possibilita um melhor comportamento mecânico em estruturas geotécnicas	Geotêxteis, Geogrelhas, Geobarras, Geocélula	Fundações, estrutura de solo reforçado, aterros sob solo mole, base pavimentos
Controle de Erosão Superficial	Prevenção de processos erosivos ocasionado pelo escoamento superficial de fluidos	Geomantas (superficial), Geocompostos (drenagem) e Geocélula	Proteção de áreas erodidas, erosão profunda, como taludes e margens dos rios
Controle e desvio de fluxo	Minimizar o transporte de matéria entre dois meios diferentes	Geomembranas, Geocompostos argiloso para barreira de fluxo	Sistema de controle de fluxo em canais e reservatórios, contenção de resíduos e resíduos perigosos.

Fonte: (Adaptado Urashima, 1996; Moreira, 2017; Guanaes, 2009; ISO 10318-1, 2015)

Quadro 5: Função dos materiais geossintéticos segundo a ISO 10318-1 (2015)

(continua)

Função	Descrição	Classificação	Exemplo
Barreira de fluxo	Desvio e condução de fluidos	Geocomposto argiloso para barreira impermeabilizante e Geomembranas	Controle de fluxo em canais, lagoas e aterros sanitários
Proteção	Previne ou diminui a possibilidade de danos em obras geotécnicas	Geoexpandido	Camada vertical compressível para reduzir pressões de solo sobre muros rígidos

Fonte: (ISO, 2015)

FOWLER *et al.*, (2005) e Silva (2017) relatam que os tubos geotêxteis utilizados para desaguamento, dessecação e acondicionamento de materiais precisam desempenhar três funções fundamentais: resistência, filtração e durabilidade. O geotêxtil deve ter resistência à tração necessária para suportar as tensões mecânicas aplicadas durante o enchimento do tubo. Em segundo lugar, o geotêxtil deve ter as propriedades hidráulicas necessárias para permitir a passagem do fluido e a retenção de partículas sólidas existentes na mistura. Em terceiro lugar, o geotêxtil deverá ter a durabilidade necessária à vida útil de projeto, suportando além das cargas e esforços aplicados durante o processo de instalação e as condições sofridas ao longo do tempo.

Para que sejam garantidas estas funções dos tubos geotêxteis, o geossintético a ser utilizado deve ser especificado quanto a resistência à tração, permeabilidade, abertura de filtração, resistência à luz solar, resistência química, resistência ao funcionamento e ainda à resistência da costura utilizada para fazer o fechamento dos tubos (SILVA, 2017).

3.4.1 Propriedades Físicas dos Materiais Geossintéticos

Shukla (2002) e Moreira (2017) define as propriedades físicas dos geotêxteis como: massa por unidade de área, espessura, arranjo estrutural das fibras, porosidade e rigidez. Tais propriedades são extremamente afetadas por fatores como temperatura e umidade.

Silva (2017) fala que a gramatura (M_A) é a nomenclatura utilizada para exprimir o peso por unidade de área de um geotêxtil. Para um dado tipo de polímero a gramatura pode ser diretamente relacionada às propriedades mecânicas do geotêxtil.

Já a espessura (t_{GT}) pode simplificadaamente ser definida como a distância entre as superfícies superior e inferior do material, para uma dada pressão. A NBR ISO 9863 (ABNT, 2013), prescreve o método para determinação da espessura nominal do geotêxtil, que tem influência direta no comportamento mecânico e hidráulico dos geotêxteis.

A porosidade de um geotêxtil pode ser definida como a razão entre o volume de vazios do geotêxtil e seu volume total ou ainda, segundo Giroud (1996), relacionar a gramatura (M_A)

expressa em g/m^2 , espessura de um geotêxtil em mm e massa específica das fibras (ρ_f) em gramas, conforme Equação 1:

$$n = 1 - \frac{M_A}{\rho_f t_{GT}} \quad \text{Equação 1}$$

Segundo Gardoni (2000), a abertura de filtração (O) de um geotêxtil é o parâmetro mais importante para o dimensionamento de filtros de geotêxteis. Essa abertura de filtração é definida como o tamanho da maior partícula de solo capaz de atravessar o geotêxtil.

3.4.2 Propriedades Mecânicas dos Materiais Geossintéticos

Shukla (2002) e Moreira (2017) comenta que as principais propriedades mecânicas dos geotêxteis são resistência à tração, a fluência, a perfuração, ao rasgo e a compressibilidade.

Silva (2017), relata que a condição crítica de solicitação de um tubo geotêxtil é a fase de enchimento, na qual as tensões axiais de tração do geotêxtil podem atingir valores próximos ao limite máximo. O comportamento à tração de um geotêxtil depende de fatores como o polímero constituinte, a estrutura, processo de fabricação, tipo de ligação, entre outros.

Outra propriedade mecânica importante é a resistência ao rasgamento, que corresponde à ruptura progressiva resultante de duas ações: a perfuração que se refere à condição local; e a tração referente às tensões distribuídas. Deste modo, a força de rasgamento reflete a resistência do geossintético à propagação de rasgos locais.

3.5.3 Propriedades Hidráulicas dos Materiais Geossintéticos

Lopes e Lopes (2010) trazem as propriedades hidráulicas de geotêxteis como: permeabilidade, permissividade, transmissividade e abertura de filtração.

De acordo com as propriedades mais importantes de cada geossintético, o material é apto a desempenhar determinadas funções, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Relação entre as propriedades e as funções dos geossintéticos (adaptado de Lopes, 1998)

Propriedade	Funções					
	Drenagem	Filtragem	Separação	Reforço	Proteção	Barreiras de fluidos
Espessura	3	1	-	-	3	2
Compressibilidade	3	2		-	1	-
Resistência à tração	-	-	1	3	1	1
Módulo de rigidez	-	-	-	3	-	2
Deformabilidade	-	-	3	1	1	3
Resistência ao rasgamento	-	-	3	2	3	3
Resistência ao funcionamento	-	-	3	2	3	3
Atrito	-	-		3	1	-
Transmissividade	3	1		-	-	-
Distribuição de poros	2	3	2	-	-	-
Permissividade	2	3	2	-	-	-

Fonte: (Adaptado de Lopes, 1998)

Onde: **1** Propriedade de pouca significância, **2** Propriedade de média significância e **3** Propriedade de alta significância

Para Silva (2017), os sistemas de filtro com geotêxteis são dimensionados para atender ao critério de retenção e permeabilidade. Sob um fluxo de água em condições estáticas ou dinâmicas, o atendimento ao critério de retenção visa impedir a passagem das partículas de solo através do filtro. Por outro lado, segundo o critério de permeabilidade, deve-se permitir o livre escoamento dos fluidos. Assim, o filtro deverá ter aberturas pequenas o suficiente para prevenir a excessiva migração de partículas de solo para o exterior do tubo, mas grandes o suficiente para permitir um adequado fluxo de líquido, sem redução substancial da vazão filtrada.

3.5 DESAGUAMENTO DE RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA POR MEIO DE TUBOS GEOTÊXTEIS

Guimarães e Urashima (2013) relatam que os geossintéticos usados para o desaguamento de resíduos finos geralmente são os geotêxteis tecidos, não tecidos e os geocompostos. Estes materiais devem possuir bom desempenho de filtração, tendo capacidade de reter sólidos e ao mesmo tempo permitir o escoamento de fluidos.

O emprego de geotêxteis em sistemas de desaguamento de resíduos ou rejeitos com alto teor de líquido em relação ao teor de sólidos, como resíduos gerados em decantadores de ETA, lamas de processos de mineração, dentre outros distintos processos, tem aumentado nas últimas décadas. Tal fato se dá por tratar-se de uma solução eficiente e viável do ponto de vista técnico,

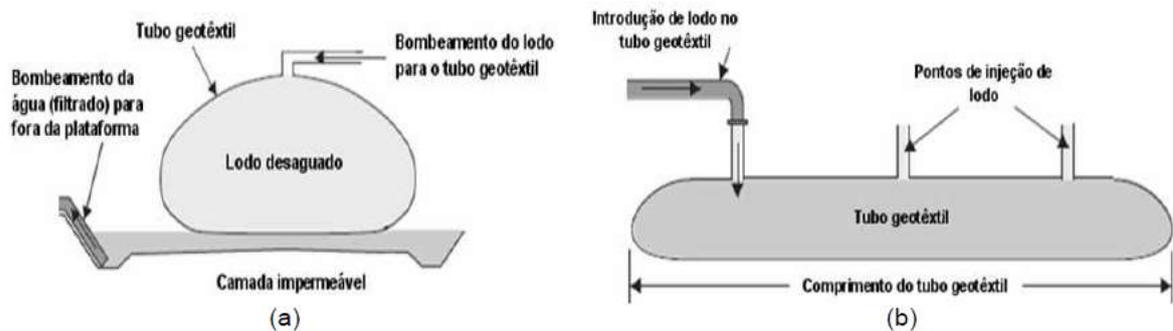
econômico e ambiental. Os sistemas fechados de geotêxteis possibilitam o desaguamento da fase líquida e o confinamento da fase sólida do resíduo, surgindo como uma contribuição quanto à problemática de disposição destes resíduos (Fowler *et al.*, 2002; Lawson, 2008; Moo-Young *et al.*, 2002; Moo-Young e Tucker, 2002; Muthukumaran e Ilamparuthi, 2006; Satyamurthy e Bhatia, 2009).

Fowler *et al.*, (1996) e Lawson (2008) relataram que as primeiras aplicações de sistemas fechados de geotêxteis para desaguamento de resíduos foi na década de 1990, com resíduo de esgoto. A técnica utilizada permitiu o controle das variáveis de entrada e de saída do sistema. Para Urashima *et al.*, (2010) o processo de desaguamento sofre influência de vários fatores, tais como: viscosidade do líquido, distribuição granulométrica e porcentagem de sólidos na polpa, área superficial do sólido e formato da partícula sólida.

O método consiste no bombeamento de resíduos para dentro de sistemas fechados de geotêxteis, que retêm a porção sólida e permitem a passagem do líquido (Figura 7). Trata-se de uma alternativa vantajosa, pois torna viável a redução de volume, facilitando o manuseio, transporte e disposição final dos sólidos ou mesmo sua reutilização. O sistema também demanda pequenas áreas para o desaguamento – em relação aos leitos de secagem – além de possuir um sistema de fácil operação e manutenção (MOREIRA, 2010; MENDES *et al.*, 2001; FOWLER *et al.*, 2002; MOO-YOUNG *et al.*, 2002; SHIN E OH, 2003; KOERNER E KOERNER, 2006; MUTHUKUMARAN E ILAMPARUTHI, 2006; LAWSON, 2008; SATYAMURTHY E BHATIA, 2009).

Carrol (1983) mostrou que satisfeitas as condições de permeabilidade e retenção de filtro geotêxtil, é necessário avaliar o funcionamento do filtro em função das iterações entre o material a ser filtrado e o geotêxtil que podem levar ao processo de colmatação. O processo de colmatação pode ser entendido como a penetração de partículas finas dentro do geotêxtil, bloqueando os canais de fluxo ou formando películas de partículas finas a montante do filtro, reduzindo sua permeabilidade (SILVA, 2017).

Figura 7: Detalhes do desaguamento em tubos de geotêxteis: (a) Vista frontal; (b) vista lateral



Fonte: (Adaptado de Lawson, 2008; Guimarães *et al.*; 2011)

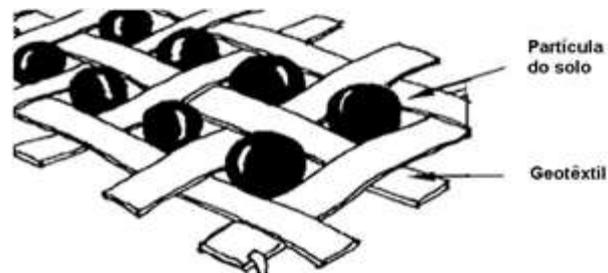
Durante a filtração é estabelecido um fluxo de água que pode levar ao arraste de algumas poucas partículas de resíduo/solo, que não se encontram consolidadas em sua matriz, em direção ao filtro geotêxtil. Estas partículas deslocadas podem interagir com o geotêxtil de diferentes maneiras levando à erosão interna (*piping*), cegamento (*blinding*) ou “*filter cake*”, bloqueamento (*blocking*) ou colmatação física (*clogging*).

Muñoz (2005) relata da importância de observar a eficiência do sistema filtrante, formado pelos geotêxteis, na filtração de água com partículas suspensas. Quando a partícula encontra o filtro há uma tendência de que ela se deposite na superfície do mesmo ou em seu interior, gerando a chamada colmatação. Tal fenômeno diminui os espaços vazios e, de maneira geral, segundo Freitas (2003), uma colmatação branda é sempre prevista. Entretanto, ao longo do tempo e a depender das condições, pode vir a causar uma redução indesejável da permeabilidade.

Vários autores Spada (1991); Mendonça (2000); Palmeira e Gardoni (2000); Muñoz, (2005); Barroso (2007); Barbosa (2011); Ortiz (2012), Moreira (2017) e Silva (2017) descrevem que os principais mecanismos responsáveis pela colmatação física são o “*Piping*” ou erosão interna, bloqueamento, o cegamento e a colmatação interna. Estes mecanismos podem ser explicados como:

- “*Piping*” ou erosão interna: partículas do material desaguado passam continuamente através do geotêxtil;
- Bloqueamento: partículas individuais do material filtrado obstruem as aberturas do geotêxtil tecido, formando o mecanismo conhecido como bloqueamento de filtro, que implica numa severa redução da permeabilidade do geotêxtil (Figura 8).

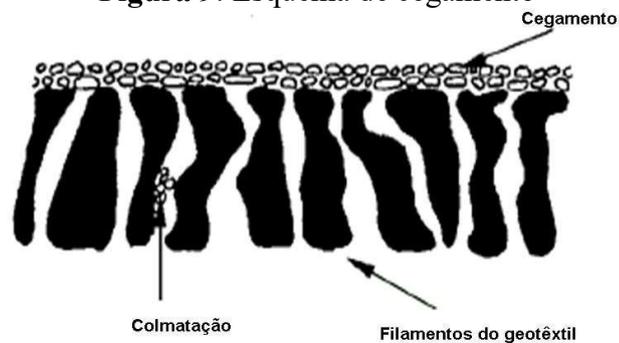
Figura 8: Esquema de bloqueamento



Fonte: (Adaptado de John, 1987 apud Barroso, 2007)

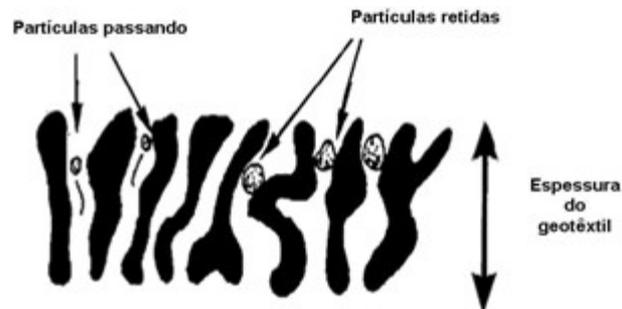
- “*Filter Cake*” ou cegamento: as partículas mais finas do material desaguado migram, segundo o processo de sufusão (movimento de partículas mais finas através dos poros da matriz de partículas mais grossas do solo), em direção ao geotêxtil. Caso essas partículas não sejam pequenas o suficiente para passar através dos poros do geotêxtil, elas se agrupam formando uma fina camada na superfície interna do tubo geotêxtil. Esta fina camada é denominada “*filter cake*” e reduz substancialmente a capacidade drenante do filtro (Figura 9).

Figura 9: Esquema de cegamento



Fonte: (Adaptado de John, 1987 apud Barroso, 2007)

- Colmatação interna: retenção de partículas de solo, que migraram junto ao fluido, ao longo da espessura do geotêxtil, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 10: Esquema de Colmatação

Fonte: (Adaptado de John, 1987 apud Barroso, 2007)

3.6 FORMAÇÃO DO “*FILTER CAKE*”

Estudos realizados por Gaffney *et al* (1999), Leshchinsky e Leshchinsky (1996), indicam que na filtração de sedimentos de granulometria fina a perda de partículas através do geossintético cessa rapidamente, e a água drenada torna-se menos turva. Essa redução da turbidez associada à redução da permeabilidade foi justificada pelos autores pela formação do “*filter cake*”, o qual aumenta a filtração, porém diminui a permeabilidade. Essa teoria foi ainda reforçada por Moo-Young e Tucker (2002), que observou em seus experimentos que a quantidade de sólidos em suspensão no início do processo de filtração por meio de tubos geotêxteis é alta, mas diminui sensivelmente assim que ocorre a formação de “*filter cake*” (SILVA, 2017).

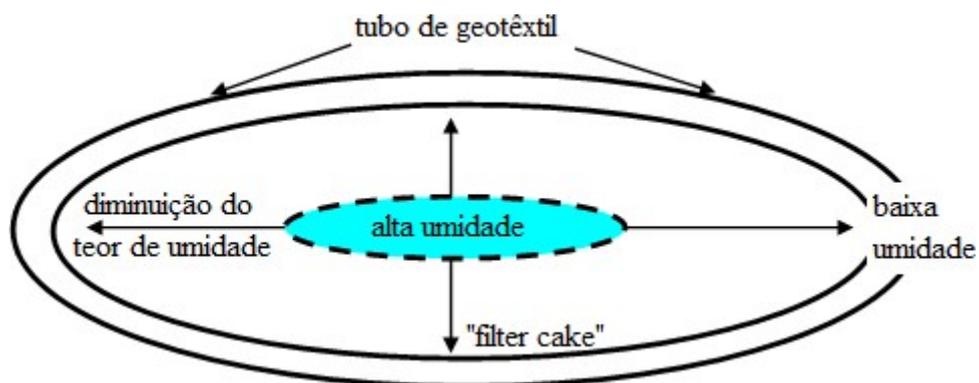
Estes fenômenos de colmatação foram ainda associados por Gaffney *et al* (1999), com o teor de umidade da fração sólida retida no interior do tubo. Em seus estudos observou que a colmatação dificulta a saída de fluido do sistema, o que implica em um teor de umidade elevado para os sólidos retidos no interior dos tubos. Gaffney *et al.*, (1999) observou ainda que a umidade diminui gradativamente do centro para as extremidades do tubo, o que em alguns casos pode levar a necessidade de abertura de tubos para exposição e secagem do material retido.

Em campo, caso a permeabilidade do geotêxtil seja suficientemente alta e a abertura de filtração pequena, haverá inicialmente um aumento na taxa de desaguamento do material, implicando numa maior passagem de partículas finas pelo geotêxtil. Ao longo do desaguamento, algumas partículas de sólidos começam a vedar as aberturas de filtração do geotêxtil, ocupando os seus poros. Dessa forma, a permeabilidade do geotêxtil é reduzida, até a formação do “*filter cake*”, dificultando a saída do efluente. O “*filter cake*” é uma massa do material retido que se forma no interior da bolsa, devido à colmatação do geotêxtil. A sua formação pode ser controlada

pela abertura de filtração do geotêxtil, distribuição dos tamanhos das partículas do solo e umidade do solo.

A formação de “*filter cake*” pode ser verificada por meio da distribuição de umidade após o desaguamento. Uma camada fina de baixa umidade do material retido é formada nas proximidades do geotêxtil, funcionando como filtro para reter as partículas finas do material encontrado no centro da bolsa (GAFFNEY *et al.*, 1999). Assim, a umidade do material aumenta em função da distância do geotêxtil, concentrando um alto teor de umidade no centro (Figura 11). Para o desaguamento deste “*filter cake*”, é necessário aumentar o tempo de adensamento, expor o material retido ao ar a partir de uma abertura na bolsa para evaporação da parte úmida, ou executar outras seqüências de re-enchimento da bolsa. Porém, este processo requer maior tempo de execução, sabendo que a saída de líquido ocorre pela superfície, necessitando de muito mais tempo para perder a umidade retida no centro do material, aumentando também o custo da obra (GAFFNEY *et al.*, 1999 e CASTRO 2005).

Figura 11: Distribuição da umidade e formação do “*filter cake*”



Fonte: (Adaptado de Gaffney *et al.*, 1999; Castro, 2005)

Moreira (2017) relata que há um consenso na literatura relacionado à importância do condicionamento químico, sendo este essencial no desaguamento de resíduos que apresentem uma elevada resistência a filtração. Consiste na adição de produtos, ao resíduo, que promovam a aglutinação das partículas a serem removidas, tornando o peso específico das mesmas maior que o da água. Dessa forma a tendência é haver uma diminuição da resistência a filtração causada pela aglomeração de partículas sólidas. Assim, o desaguamento ocorre num período mais curto. Os resíduos devem ser submetidos a este condicionamento antes da etapa de desidratação. O tipo de condicionamento afeta diretamente a eficiência do processo de desidratação. Para tanto, os principais tipos de coagulantes usados são sais metálicos, cal e polímeros orgânicos – polieletrólitos (ANDREOLI, 2001; GUANAES, 2009; GUIMARÃES *et al.*, 2014).

Nesta pesquisa os ensaios foram realizados com polímeros orgânicos, que são compostos sintéticos com alto peso molecular. Para Andreoli (2001) os polímeros podem ser classificados em catiônicos, aniônicos e não iônicos. São comercializados em forma de pó ou líquido e por possuírem elevada concentração, para serem utilizados, é necessário que sejam solubilizados em água (MOREIRA, 2017).

Andreoli (2001) aponta as principais vantagens no uso de polímeros ao invés de condicionadores inorgânicos:

- Enquanto condicionadores químicos inorgânicos comumente aumentam a massa de resíduo produzida em 15% a 30%, com uso de polímeros o acréscimo de massa é pequeno;
- Caso o resíduo desidratado seja utilizado como combustível para incineração, polímeros não reduzem sua aptidão à combustão;
- As operações de manuseio de polímeros são mais limpas e seguras;
- Os polímeros apresentam menos problemas de operação e manutenção.

Para Di Bernardo *et al* (2011) e Andreoli (2001), a seleção do polímero requer um trabalho cuidadoso, sendo que os testes devem ser preferencialmente realizados com o próprio resíduo a ser condicionado. Para Ferreira Filho e Além Sobrinho (1998) e Di Bernardo *et al* (2011), a escolha do polímero é feita por meio de ensaios de laboratórios e posterior otimização do processo em escala real. Andreoli (2001) apresenta os principais fatores que podem vir a afetar o condicionamento conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6: Relação dos principais fatores que afetam o condicionamento do resíduo

Fator	Efeito sobre o condicionamento
Tamanho das Partículas	É o principal fator de influência na desidratação. Devido ao atrito, o tamanho médio das partículas diminui, resultando em um crescimento exponencial da relação superfície/volume e em um maior grau de hidratação, maior demanda de produtos químicos e aumento da resistência à desidratação.
Agitação excessiva	A agitação deve fornecer energia apenas para a dispersão do floculante no resíduo, permitir a aproximação das partículas em suspensões coloidais e manter a integridade dos flocos.
Quantidades de condicionantes	O nível de hidratação e o conteúdo de partículas finas do resíduo podem ser aumentados por meio de atrição, aquecimento ou estocagem. O transporte por tubulações até uma central de processamento, a estocagem durante um fim de semana ou por períodos prolongados, modificam as características do resíduo e aumentam a demanda de condicionantes resíduo e aumentam a demanda de condicionantes

Fonte: (Adaptado de Andreoli, 2001)

Silva (2017), menciona que apesar da expectativa de aumento da eficiência do processo com a utilização de condicionante químico, é importante que sejam realizados ensaios para verificação da reação deste tipo de polímero com o material a ser desaguado. Em testes realizados

por Satyamurthy e Bhatia (2009), foi observado que o tipo e a concentração de alguns polímeros podem até mesmo ter efeito reverso e aumentar o tempo de desaguamento, implicando em resultado contrário ao desejado para estes testes que visam a redução no tempo de desaguamento e diminuição da turbidez do efluente.

Vertematti (2015) apresenta um resumo dos tipos de coagulantes e floculantes mais utilizados e o seu funcionamento quando em contato com sólidos suspensos. No Quadro 7 é apresentado um resumo destes principais condicionantes químicos.

Quadro 7: Resumo dos condicionantes químicos mais utilizados

Condicionantes Químicos	Função
Polímeros aniônicos	Geração de “pontes” entre partículas já coaguladas e a cadeia de polímero, gerando flocos de maior diâmetro.
Polímeros catiônicos	Neutralização das cargas elétricas superficiais que envolvem os sólidos suspensos e incremento do tamanho dos flocos formado (via formação de pontes). Usualmente utilizado no tratamento de lamas orgânicas.
Cátions	São polieletrólitos catiônicos de baixa peso molecular, os quais possuem como função principal a neutralização das cargas elétricas superficiais e aumento do tamanho dos flocos. Utilizada em substituição aos floculantes inorgânicos convencionais.
Hidróxido de Cálcio (Ca (OH) ₂)	Usualmente utilizado como agente controlador do pH. Porém, alguns íons de cálcio atuam também como agentes de neutralização das cargas elétricas superficiais, funcionando como um coagulante inorgânico.
Sulfato de Alumínio (Al ₂ (SO ₄) ₃); Policloreto de Alumínio (PAC); Cloreto Férrico (FeCl ₃); Sulfato ferroso (FeSO ₄)	Cátions polivalentes (Al ³⁺ , Fe ³⁺ , Fe ²⁺ , etc) neutralizam as cargas elétricas das partículas suspensas e os hidróxidos metálicos ao adsorverem as partículas, gerando uma floculação parcial.

Fonte: (Adaptado de Vertematti, 2015; Silva, 2017)

3.7 PESQUISA DESENVOLVIDAS SOBRE TUBO GEOTÊXTIL PARA DESAGUAMENTO

Com objetivo de melhorar a eficiência de desaguamento com uso de geotêxtil, diversos trabalhos já foram desenvolvidos, envolvendo diferentes tratamentos, processos e aditivos químicos. Alguns autores Castro (2005), Muñoz (2005), Martins (2006), Bourgès-Gastaud *et al.*, (2014); Fourie *et al.*, (2007); Fowler *et al.*, (2002); Barbosa (2011), Mahmoud *et al.*, (2011), Moreira (2017) já estudaram os principais materiais com alto teor de umidade como os resíduos de estações de tratamento de esgoto, rejeitos de mineração, filtração de solos e lama asfáltica.

Para Fowler *et al.*, (2002), o desaguamento de diversos tipos de materiais com alto teor de umidade, como lamas de mineração, lodo de estação de tratamento de esgotos, etc., vem sendo realizado em bolsas geotêxteis desde o final da década de 1980, sendo essa uma técnica eficiente

para melhorar a qualidade do resíduo, diminuir seu tempo de secagem e reduzir os riscos de impacto ambiental. Entretanto, ainda é preciso ampliar o conhecimento sobre o seu funcionamento mecânico e hidráulico e quanto aos aditivos a utilizar.

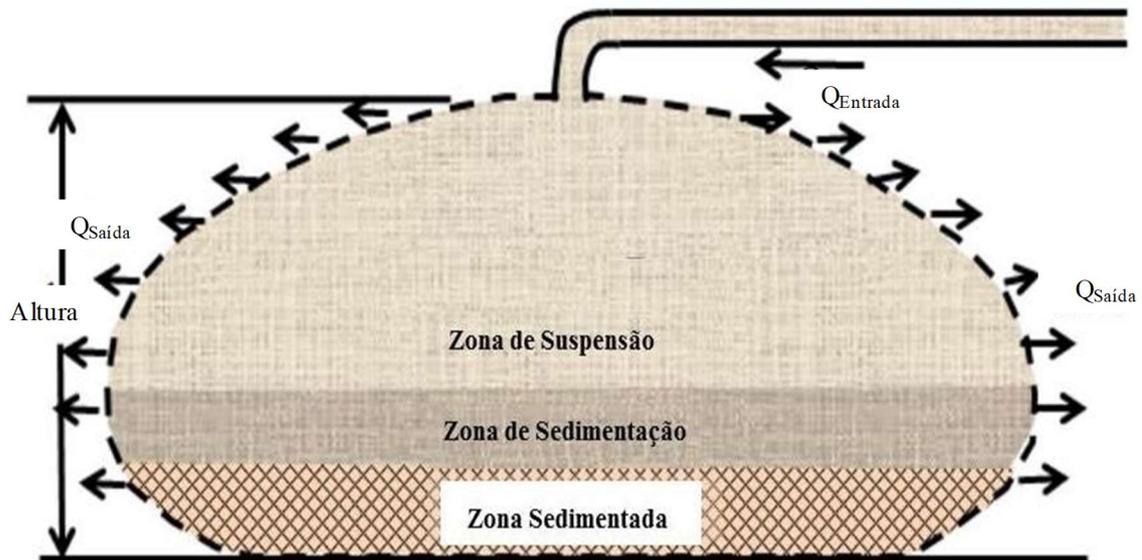
A necessidade de maximização tanto da retenção dos sólidos em suspensão quanto da velocidade de desaguamento comumente leva ao uso de polímeros catiônicos ou aniônicos, que funcionam como aceleradores químicos do desaguamento. Esses produtos são utilizados para estimular a formação de flocos e assim acelerar a taxa de desaguamento (GRZELAK *et al.*, 2011).

Segundo Grzelak *et al.* (2011), o condicionante químico ideal e sua dosagem dependem especificamente de cada material a ser tratado. Assim, ensaios de pequena escala devem ser executados a fim de selecionar o polímero mais apropriado para cada caso e sua dosagem *versus* pH.

Os sistemas fechados em geotêxtil utilizados em ETA são geralmente submetidos a diversos reenchimentos. Leshchinsky e Leshchinsky (1996) e Avancini (2017) afirmam ser o bombeamento do resíduo o fator mais crítico para assegurar o bom funcionamento do sistema, destacando que mesmo um pequeno aumento na pressão de bombeamento pode aumentar significativamente os esforços atuantes na bolsa em geotêxtil.

Morgan (2014) e Avancini (2017) relatam que durante a fase de enchimento do tubo geotêxtil, três zonas são formadas dentro da bolsa. Na parte superior, forma-se a zona de suspensão, onde os sólidos encontram-se em suspensão na água. Logo abaixo, encontra-se a zona de sedimentação e ao fundo, a zona sedimentada, onde os sólidos localizam-se depositados ao fundo da bolsa. A Figura 12 esquematiza as três zonas citadas. Na realidade, essas zonas podem não ser tão bem definidas em função da pressão sob a qual o lodo é bombeado, criando turbulência e revolvendo os sólidos que já estavam depositados.

Figura 12: Esquema das zonas formadas durante o reenchimento da bolsa geotêxtil



Fonte: (Adaptado de Morgan, 2014; Avancini, 2017)

Apesar da grande expansão do desaguamento de resíduos de ETA em tubos geotêxteis, ocorrido principalmente no Brasil na última década, existem poucos trabalhos na literatura que pesquisaram mais detalhadamente critérios de projeto e operação. Para o desaguamento dos resíduos de ETA, foram adotados critérios dos primeiros sistemas que já utilizavam a tecnologia, como o desaguamento de resíduos de mineração e dragagem de áreas contaminadas.

Dentre os principais critérios e parâmetros que merecem atenção nas pesquisas sobre os resíduos de ETA, podemos citar: o valor mínimo de teor de sólidos que o resíduo deve ter para ser desaguado, e como estimar o teor de sólidos ao final do desaguamento/secagem do material. Para Di Bernardo *et al.* (2017), os resíduos de ETA possuem características específicas, devido principalmente a grande variabilidade da qualidade da água bruta e mudanças nos tipos e quantidade de produtos químicos. A seguir são apresentados alguns trabalhos na literatura sobre o uso de tubos geotêxteis com resíduos gerados no tratamento de água tratada.

Pieper (2008) estudou o desaguamento do resíduo de decantador de uma ETA de ciclo completo em Gravataí-RS. O trabalho foi dividido em duas etapas, sendo a primeira com ensaios de BAG suspenso (HBT) para a definição da dosagem do condicionante químico. A segunda etapa foi realizada com um tubo geotêxtil em escala piloto de aproximadamente 20m³ de capacidade. Foram feitos ensaios de batelada para o enchimento do tubo, com a dosagem e tipo de polímero definidos nos ensaios HBT. O percentual de teor de sólidos do resíduo bombeado variou entre 0,10% a 6%, tendo uma média de 1,0 %. O autor relata que não foi possível manter

o teor de sólidos homogêneo durante todo o trabalho, fato que pode ter interferido nos resultados do experimento. O trabalho apresenta resultados de teor de sólidos no resíduo desaguamento somente para os ensaios de HBT. Para estes ensaios obteve-se teores de sólidos de 29%. Os dados na unidade piloto de tubo geotêxtil não foram detalhados, onde o autor apresentou somente os valores de volume e vazão do resíduo. No trabalho não foi investigado a curva de secagem do resíduo, após a enchimento e encerramento do tubo geotêxtil.

Guanaes (2009) estudou o desaguamento de resíduos de ETA em uma unidade piloto pressurizada em bolsa de pequena dimensão (GDT), com capacidade de 29 L. O resíduo era proveniente de decantadores de uma ETA de ciclo completo, com teor de sólidos de 1,9%. Durante os ensaios na unidade piloto, a pressão na entrada do tubo geotêxtil foi mantida em 20 kpa. A definição do tipo e dosagem de polímero foi feita em ensaios de teste de bancada por gravidade. A eficiência de filtração (EF) durante os ensaios, se manteve entre 95,10% e 99,30%, reduzindo substancialmente os sólidos totais no efluente filtrado. A turbidez média resultou em um patamar relativamente baixo, inferior a 40 uT. Verificou-se decréscimo acentuado da vazão em relação ao tempo, devido à formação do *filter cake*, que diminuiu a permeabilidade da manta de geotêxtil.

Tominaga (2010) estudou os procedimentos para avaliação de desempenho do tubo geotêxtil para desaguamento. Foram realizados no laboratório de geossintéticos, ensaios de cone e de bolsa de pequena dimensão com diferentes tipos de materiais e procedimentos propostos de ensaio. A pesquisa estudou três tipos de resíduo, sendo a caulinita com teor de SST de 142 g/L, pó-de-pedra PPA com teor de SST de 142 g/L e resíduo de ETA com teor de SST de 171 g/L. A análise dos resultados mostra que o sistema de ensaio dever ser reavaliado, pois o peso do tubo vertical utilizado para o preenchimento das bolsas causa adensamento no material retido, o que não é observado em campo. Além disso, a proposta de norma de GRI-GT15, que analisa o procedimento deste ensaio, não avalia o desempenho de desaguamento de todos os tipos de materiais de enchimento. Portanto, os procedimentos de ensaio de bolsa de pequena dimensão deverão ser revistos, a fim de poder avaliar o desempenho do sistema de desaguamento, otimizando esta técnica.

Guimaraes *et al.* (2014), utilizando a mesma configuração da unidade piloto de Guanaes (2008), verificaram o desaguamento de resíduo decantador de uma ETA de ciclo completo, com 1,3% de teor de sólidos. A pressão de entrada do resíduo bombeado foi mantida em 15 kpa. A grande contribuição deste trabalho para a pesquisa de tubos geotêxteis, foi a realização de uma curva de secagem para o teor de sólidos no resíduo desaguado.

Ferreira e Vianna (2013) estudaram em escala de bancada por meio de testes de gravidade, o desaguamento de resíduos de estação de tratamento de água. O diferencial deste foi a análise separada do desaguamento da água de lavagem de filtros (ALF), com a descarga dos decantadores. Os dois resíduos possuem teor de sólidos muito diferentes, tendo a ALF valores bem baixos (0,02 % - 0,035 %) e as descargas de decantadores teores mais elevados (1,0% a 4,0%). A principal conclusão do trabalho foi que a água de lavagem de filtros não deve ser encaminhada diretamente aos tubos geotêxteis, em virtude de seu baixo teor de sólidos; é recomendável decantá-la, eventualmente após receber a aplicação de um condicionante químico; somente o resíduo resultante desse processo deverá ser encaminhado ao geotêxtil. O resíduo retido no geotêxtil, proveniente da descarga do decantador, apresentou teor de sólidos satisfatório (29,65%), sem adição de polímeros. Como a pesquisa utilizou o método de ensaio de bancada por gravidade, os dados não podem ser extrapolados para a escala real. A literatura relata que este método é indicado apenas para a definição do tipo e dosagem de condicionantes químicos, pois não tem a inserção da pressão interna no geotêxtil.

Avancini (2017) estudou o desaguamento do lodo de estações de tratamento de água em sistemas de confinamento em geotêxtil. A pesquisa visou compreender os fatores que interferem nas eficiências de filtração e de desaguamento, na qualidade do efluente e do resíduo desaguado e analisar experimentalmente o processo de desaguamento do resíduo de ETA, avaliando os procedimentos de ensaio propostos pela literatura e investigando a influência do tipo e dosagem de aditivos sobre o desempenho do sistema de desaguamento. Foram realizados ensaios de desaguamento em cone geotêxtil e ensaios de desaguamento em bolsa de pequena dimensão, utilizando quatro amostras de geotêxtil e duas amostras de resíduo de ETA. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que, mesmo resíduos com características diferentes, apresentaram bons resultados de desaguamento para o geotêxtil selecionado. Além disso, foi possível confirmar que os resultados encontrados nos ensaios de desaguamento em cone para seleção do geotêxtil e para a seleção e dosagem do polímero apresentaram resultados satisfatórios, que se refletiram nos ensaios em bolsa de pequena dimensão. Os resultados obtidos nos ensaios de desaguamento em bolsa de pequena dimensão, utilizando resíduo condicionado com polímero, indicam que para as condições avaliadas, o condicionamento químico levou ao aumento na taxa de desaguamento e na retenção de sólidos no início do ensaio, entretanto não acarretou o aumento no teor de sólidos final da torta de lodo

Para Moo-Young *et al.*; (2002), os resultados do ensaio de bolsa são avaliados a partir de análises de eficiência dos parâmetros envolvidos no processo, sendo os mais frequentemente

citados na literatura a eficiência de filtração, de desaguamento, de infiltração, de retenção e sólidos passantes (MOO-YOUNG E TRUCKER, 2002; e LIAO E BHATIA, 2006).

Moo-Young *et al.*; (2002), sugerem que a análise da Eficiência de Filtração (EF) do sistema pode ser obtida comparando a quantidade de Sólidos Suspensos Totais (SST) do filtrado, ou seja, do efluente, com a quantidade de Sólidos Totais (TS) inicial da amostra.

Para Tominaga (2010), os resultados do ensaio da instalação-piloto são avaliados a partir de análises de eficiência dos parâmetros envolvidos no processo, sendo os mais frequentemente citados na literatura eficiência de filtração, eficiência de desaguamento, perda de partículas, porcentagem de desaguamento.

3.7.1 Eficiência de filtração (EF)

A eficiência de filtração é a capacidade do geotêxtil em reter sólidos, filtrando o máximo de água. Este valor, segundo Moo-Young e Trucker (2002) e Liao e Bhatia (2006), é determinado por:

$$EF(\%) = \frac{ST_{inicial} - ST_{final}}{ST_{inicial}} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

onde EF é a eficiência de filtração (%), $ST_{inicial}$ é o valor de sólidos totais iniciais do material antes de ser desaguado (mg/L) e ST_{final} é o valor de sólidos totais no efluente (mg/L), obtido por secagem.

Moo-Young *et al.* (2002) foi o primeiro a citar esta expressão na literatura, mas o fator de sólidos totais finais é substituído por sólidos suspensos totais no efluente. Porém, o uso deste fator não é coerente, pois, na realidade, os sólidos encontrados no efluente são a soma dos sólidos suspensos e sólidos dissolvidos no efluente. Uma alta eficiência de filtração indica que boa parte das partículas finas do material preenchido é retida pelo geotêxtil.

O valor de sólidos suspensos totais do efluente é geralmente alto apenas no início do desaguamento, podendo reduzir-se drasticamente quando há formação de “filter cake” (LIAO e BHATIA 2006). Estes autores comentam que a alta eficiência de filtração é proveniente da combinação entre a permeabilidade do geotêxtil e a formação do “filter cake”. O presente trabalho considera que seria mais apropriado considerar a combinação entre a abertura de filtração do geotêxtil e a formação do “filter cake” (TOMINAGA, 2010).

3.7.2 Eficiência de desaguamento (ED)

Moo-Young *et al.* (2002) também propõe que a eficiência de desaguamento e a capacidade do geotêxtil em reter partículas sólidas permitindo a filtração da parte líquida, seja determinada por:

$$ED(\%) = \frac{PS_{final} - PS_{inicial}}{PS_{inicial}} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

onde ED é a eficiência de desaguamento (%), $PS_{inicial}$ é o valor de percentagem de sólidos do material antes de ser desaguado (%) e PS_{final} é a percentagem de sólidos do material retido no sistema fechado com geotêxtil após o desaguamento.

Segundo estes autores, este valor depende das propriedades hidráulicas do geotêxtil, peso específico do material e da pressão de confinamento.

3.7.3 Porcentagem de Desaguamento (PD %)

Bhatia *et al* (2013) definem a porcentagem de desaguamento (PD %) como sendo a razão entre a diferença porcentagem de sólidos inicial com $PS_{inicial}$ e PS_{Final} em relação à porcentagem de sólidos inicial com $PS_{inicial}$:

$$PD(\%) = \frac{PS_{inicial} - PS_{final}}{PS_{inicial}} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

3.7.4 Perda de Partículas (PP)

Enquanto o “*filter cake*” não é formado ou quando se forma lentamente, ocorre o carreamento contínuo das partículas, com maiores perdas de partículas finas. Em 2009 Satyamurty e Bhatia propôs avaliar também a perda de partículas por:

$$PP(\text{g}/\text{m}^2) = \frac{SST_{final}}{A} \quad \text{Equação 5}$$

onde SST é o massa de sólidos suspensos totais (g) e A é a área efetiva do geotêxtil no desaguamento. Esta expressão apresenta os sólidos suspensos totais, porém, como comentado no item 3.7.4, este termo deve ser substituído por sólidos totais no efluente, pois é ignorada uma parte dos sólidos que é dissolvido no efluente. Portanto, o correto seria:

$$PP(g/m^2) = \frac{ST_{final}}{A} \quad \text{Equação 6}$$

Satyamurty e Bhatia (2009) definem na realidade este parâmetro como “*piping*”, associando a passagem das partículas a fenômenos de erosão interna. A presente pesquisa considera, entretanto, que o termo perda de partículas é o mais apropriado ao processo de desaguamento. Conforme os autores, o “*piping*” ou perda de partículas depende das propriedades do material retido, da porosidade, viscosidade e peso específico, e das propriedades hidráulicas do geotêxtil, das condições de desaguamento e da pressão de confinamento.

Para Tominaga (2010), este fenômeno pode ser grave quando o geotêxtil não consegue reter as partículas do material, causando a instabilidade do sistema, pelo fluxo intenso e erosão interna contínua, provocados pelos grandes vazios no interior do material retido, formados pela perda das partículas sólidas. Este processo pode ser minimizado pelo adequado condicionamento químico do material a ser desaguado.

3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO

Segundo IBGE (2010), dos 5.564 municípios brasileiros, 2.098 produzem resíduo no processo de tratamento da água. Nota-se que o percentual de municípios brasileiros que destinam o resíduo de ETA em rios corresponde a 62,44%. Os resíduos gerados nos serviços de Saneamento (resíduos de ETA e ETE) não podem ser lançados em corpos d’água ou no solo sem o consentimento dos órgãos ambientais e de controle da poluição, por causarem impactos ambientais.

As tecnologias de desaguamento de resíduos mais utilizadas são os sistemas mecanizados, naturais e por filtração em leito de secagem, leito de drenagem, e em tecido especial (geotêxtil). Fowler *et al.*; (1997) relata que dificuldades enfrentadas no tratamento destes resíduos através dos métodos convencionais de desaguamento, e o custo para sua disposição, levam a uma crescente preocupação com a otimização do processo de tratamento de resíduo e sua disposição futura.

Mesmo com diversas alternativas e tecnologias disponíveis no mercado, a destinação adequada do resíduo continua sendo um desafio tanto do ponto de vista técnico quanto do econômico. Para Di Bernardo *et al.* (2017), a destinação final de resíduos encontra dois obstáculos principais: o alto custo e a complexidade operacional.

Atualmente, existem muitas incertezas sobre os parâmetros de projeto que devem ser adotados e sobre qual a combinação de geotêxtil e condicionante químico que otimiza o desaguamento. Dessa forma, surge a necessidade de realizar ensaios para previsão de comportamento de filtração e desaguamento de resíduos/rejeitos em tubo geotêxtil é indiscutível. Um aspecto de grande influência no comportamento final é o condicionamento químico, realizado por meio da introdução de produtos químicos, que podem, por exemplo, diminuir a resistência à filtração. Satyamurthy e Bhatia (2009) reforçam que dosagens maiores de condicionantes químicos tendem a melhorar a qualidade do efluente; porém, considerando os custos elevados de aquisição destes produtos, é necessário otimizar o tipo e a dosagem deste produto químicos.

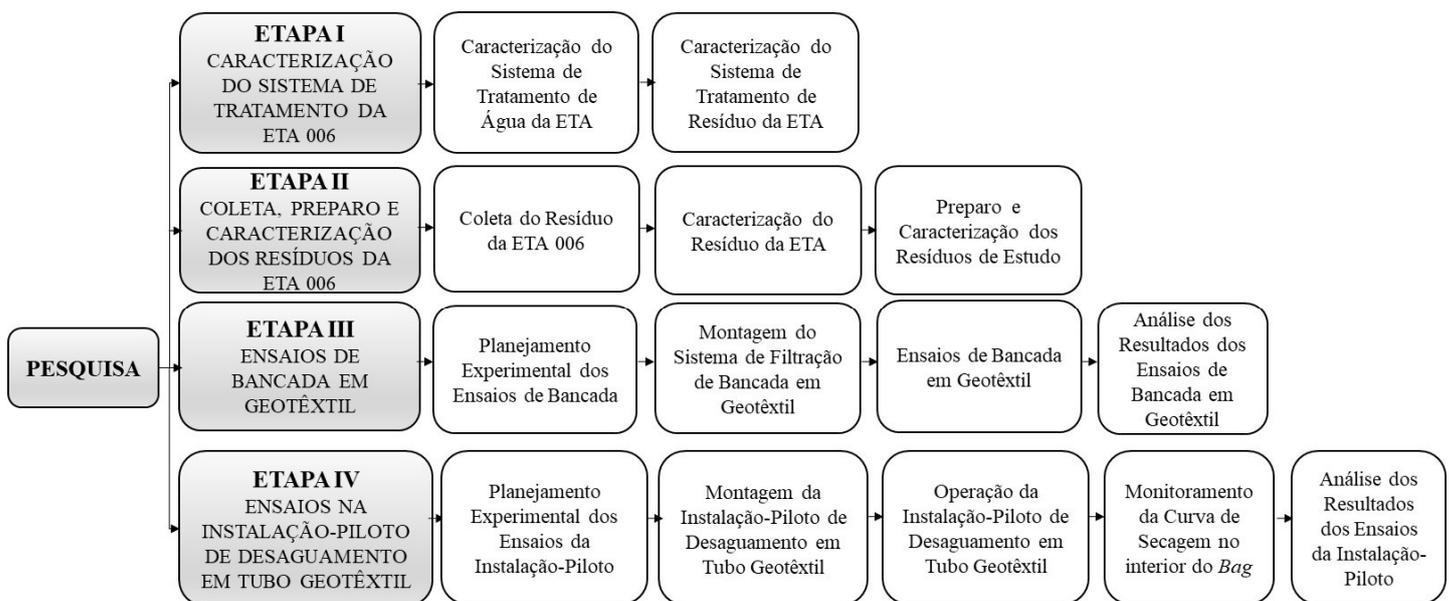
Diante do exposto, a proposta desse trabalho foi entender o comportamento da filtração em geotêxtil no desaguamento dos resíduos de estação de tratamento de água, bem como responder alguns questionamentos operacionais existentes como a influência do teor de sólidos na eficiência do resíduo a ser desaguado, influência do tipo de geotêxtil, influência do tipo e dosagem de condicionante químicos, avaliação da taxa de deságue do geotêxtil ao longo do tempo de operação e os tempos máximo e mínimo de desidratação necessários. A obtenção de tais parâmetros torna-se relevante, sendo possível avaliar a necessidade ou não da etapa de adensamento, geralmente custosa em termos de implantação (adensadores por gravidade/flotação) e/ou operação (equipamentos mecanizados).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os detalhes do trabalho experimental. Conforme ilustrado no fluxograma da Figura 13, a pesquisa foi dividida em 4 (quatro) etapas. A ETAPA I consistiu na caracterização do sistema de tratamento de água e do sistema de tratamento dos resíduos da ETA 006 de Palmas-TO. Na ETAPA II foi realizada a coleta, preparo e caracterização dos resíduos gerados na estação de tratamento em estudo. A ETAPA III foram executados os ensaios de bancada em geotêxtil no Laboratório de Saneamento do IFTO para definição das condições otimizadas de dosagens dos condicionantes químicos no desaguamento no tubo geotêxtil. E na Etapa IV foi realizada a montagem e operação da instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil nas dependências da Estação de Tratamento de Água.

Figura 13: Fluxograma das Etapas da Pesquisa



Fonte: Autor, 2019.

4.2 EQUIPAMENTOS, PRODUTOS QUÍMICOS E MÉTODOS ANALÍTICOS

São apresentadas na Tabela 3 as especificações e a função dos equipamentos utilizados na pesquisa. Para os ensaios da bancada e da instalação-piloto, a Tabela 4 apresenta os parâmetros físico-químico, unidades, métodos de medição e limites de detecção realizadas segundo os métodos indicados no APHA (2012).

Tabela 3: Equipamentos utilizados na pesquisa

EQUIPAMENTOS	FUNÇÃO NA PESQUISA
Jarteste, Nova Ética – modelo LDB 6	Ensaio de mistura rápida
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 2100P – marca Hach	Leitura da turbidez
Conjunto moto-bomba: 2 cv, monobloco da marca NETZSCH Modelo NM031 1.710 RPM, 60 HZ vazão: 80 m ³ /h com inversor de frequência	Bombeamento do resíduo
Disco geotêxtil (ensaio de bancada) e bolsa geotêxtil (ensaio na piloto)	Filtração
Master Sizer 2000 Marca Malvern	Distribuição de tamanho de partículas do resíduo
Quanta 650 FEG e MED020 (Bal-tec)	Microscopia eletrônica de varredura e microanálise química

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 4: Parâmetros, métodos e limites de medição

Parâmetro	Unidades	Método	Limite de detecção
Alumínio	mg/L Al	EAA-Forno de grafite	0,001
Alcalinidade	mg/L CaCO ₃	Titrimétrico	1
Carbono orgânico total	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo – NPOC	0,1
Carbono orgânico dissolvido	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo – NPOC	0,1
Distribuição e tamanho das partículas	mm	Espalhamento de luz laser de baixo angulo	0,02
Ferro	mg/L Fe	EAA - Chama	0,01
Manganês	mg/L Ma	EAA - Chama	0,001
Morfologia das partículas	micrometro	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	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

Fonte: Autor, 2019.

Estão apresentados na Tabela 5 os produtos químicos utilizados como condicionantes químicos na pesquisa. As informações técnicas dos produtos utilizados encontram-se apresentadas no Anexo B.

Tabela 5: Produtos químicos utilizados como coagulantes e condicionantes químicos

Produto químico	Nome comercial	Estado físico	Massa 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)

Na Tabela 6 estão apresentadas as propriedades físicas dos geotêxteis utilizados para o desaguamento dos resíduos nos ensaios de bancada e na instalação-piloto. As informações técnicas dos geotêxteis ensaiados encontram-se apresentadas no Anexo A, conforme Huesker (2018).

Tabela 6: Propriedades físicas dos materiais geotêxteis utilizados nos ensaios

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

Fonte: (Huesker, 2018)

4.3 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DA ETA 006

4.3.1 Caracterização do Sistema de Tratamento de Água e do Sistema de Tratamento dos Resíduos da ETA 006

Para realização da ETAPA I, foram programadas visitas técnicas na estação de tratamento de água e na estação de tratamento de resíduos gerados na ETA 006. Nessa fase as informações existentes foram levantadas com objetivo de caracterizar o sistema no período no qual os ensaios foram realizados. Vale ressaltar que as características dos resíduos ensaiados no teste de bancada e na instalação-piloto, referem-se ao resíduo coletado na descarga do decantador no período de 10 a 13 de abril de 2018.

Foram levantadas do sistema de informação da Companhia de Saneamento do Tocantins todos as condições operacionais da ETA 006 no período de abril de 2018. Nessa mesma oportunidade, realizou-se uma compilação dos principais parâmetros hidráulicos de funcionamento da ETA 006 conforme relatórios disponibilizados pelo setor de Projetos da BRK Ambiental elaborados pelas empresas: Sondotécnica Engenharia (1990), Senha Engenharia, Hidrosan Engenharia (2007) e Hidrosan Engenharia (2009).

4.4 ETAPA II: COLETA, PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA ETA 006

4.4.1 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 I da ETA 006 (BRK AMBIENTAL/SANEATINS, PALMAS-TO-BRASIL). Um dos objetivos dessa coleta em batelada foi obter uma quantidade de massa (sólido suspenso total 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 14).

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 do decantador 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 medir o SST (obter valor acima 100 g/L de SST).

Figura 14: Coleta do “Resíduo Mãe”: tubulação de descarga de resíduo do Decantador I (1), detalhe do mangote na tubulação de descarga do decantador (2), coleta do resíduo no reservatório de 2000 L (3), resíduo mãe armazenado no reservatório (4)



Fonte: Autor, 2019.

4.4.2 Caracterização do Resíduo da ETA 006

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 se encontram descritas APHA (2012), conforme detalhes na Tabela 11.

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.

4.4.3 PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ESTUDO

Para os ensaios do sistema de filtração de bancada em geotêxtil e os ensaios na instalação-piloto, foi utilizado o resíduo armazenado no reservatório de 2000 L, conforme descrição detalhada no item 4.4.1. Nessa etapa, foi retirado um volume de 800 L do “Resíduo Mãe” e levado ao laboratório de Saneamento (IFTO, Palmas, Tocantins – Brasil). Posteriormente realizou-se caracterização físico-química de acordo com os parâmetros listados na Tabela 4.

A partir do “Resíduo Mãe” foram preparadas três Resíduo de Estudo (RE). 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 os resíduos de estudo, sendo: RE 1 de 0,25 g/L, RE 2 de 10,13 g/L e RE 3 de 20 g/L (Figura 15).

Figura 15: Preparo do resíduo de estudo: resíduo armazenado no reservatório (1), coleta de água filtrada da ETA 006 em bombonas para realizar as diluições (2), resíduo de estudo preparada (3)

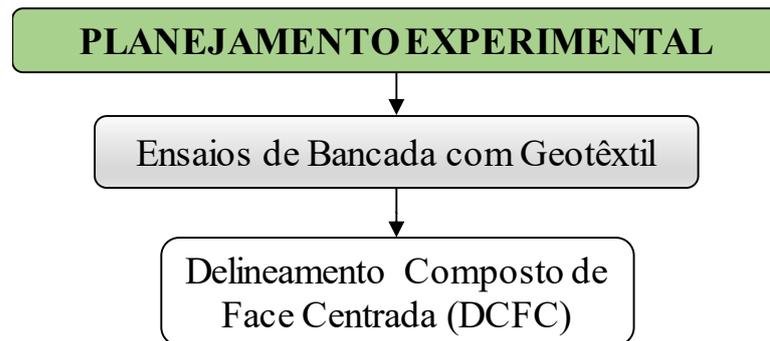


Fonte: Autor, 2019.

4.5 ETAPA III: ENSAIOS DE BANCADA EM GEOTÊXTEL

4.5.1 Planejamento Experimental dos Ensaio de Bancada em Geotêxtil

Nessa etapa foi realizado o planejamento experimental denominado de Delineamento Composto de Face Centrada 2^2 (DCFC), que teve como objetivo observar a influência dos fatores de SST do resíduo e a dosagem de polímero obtidos durante o desaguamento da filtração de bancada em geotêxtil (ver Figura 16).

Figura 16: Planejamento Experimental dos ensaios de bancada

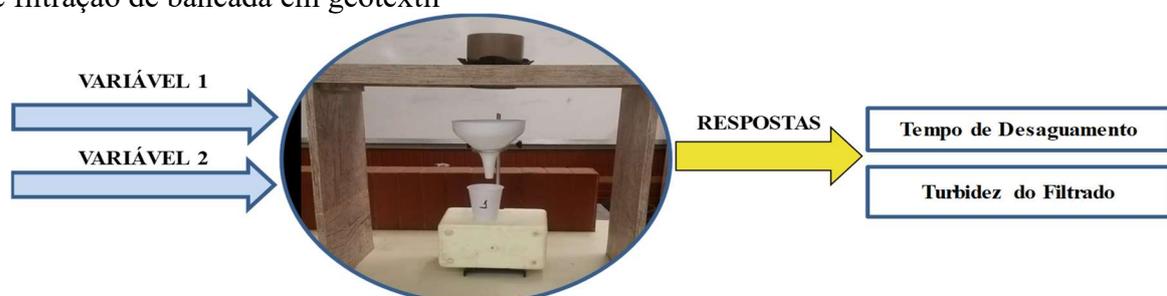
Fonte: Autor, 2019.

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 filtrado e do tempo de desaguamento (Figura 17). A análise estatística foi realizada por meio do software online Protimiza Experimental Design (<http://experimental-design.protimiza.com.br/>). As condições experimentais e seus níveis reais e codificados e os valores mínimos e máximos das variáveis são mostrados nas Tabelas 7 e 8, conforme Rodrigues e Iemma (2014).

Tabela 7: Níveis dos fatores empregados no planejamento experimental 2^3 com ponto central ou Delineamento Composto de Faces Centradas (DCFC) nos ensaios de bancada em geotêxtil

Nome da Variável	Código	Nível		
		-1	0	1
SST do resíduo inicial (g/L)	X ₁	0,25	10,13	20
Dosagem de polímero (mgPol/gSST)	X ₂	0,5	1,5	2,5

Fonte: Autor, 2019.

Figura 17: Representação do planejamento experimental 2^2 com ponto central utilizado sistema de filtração de bancada em geotêxtil

Fonte: Autor, 2019.

Onde:

Variável 1: SST do resíduo inicial (g/L) e a **Variável 2:** dosagem de polímero (mgP/gSST).

Para variável de SST do resíduo (X_1), o nível máximo (+1) de 20 g/L foi estabelecido como um valor característico das descargas de decantadores e o nível médio (0) de 10,13 g/L, como sendo típico de um tanque de mistura de água de lavagem de filtros e descargas de decantadores. O nível mínimo (-1) resultou em 0,25 g/L como valor característico da água de descarte da lavagem dos filtros.

Os valores de níveis para a dosagem dos polímeros (X_2) foram definidos baseado na bibliografia e ensaios preliminares em bancada. Foram realizados 11 experimentos, sendo três repetições no ponto central, conforme Tabela 8.

Tabela 8: Delineamento de face centrada (DFC) nos ensaios de bancada em geotêxtil

Ensaio	Variáveis	
	X_1 SST do resíduo inicial (g/L)	X_2 Dosagem de polímero (mgPol/gSST)
1	-1(0,25)	-1(0,5)
2	1(20)	-1(0,5)
3	-1(0,25)	1(2,5)
4	1(20)	1(2,5)
5	-1(0,25)	0(1,5)
6	1(20)	0(1,5)
7	0(10,13)	-1(0,5)
8	0(10,13)	1(2,5)
9	0(10,13)	0(1,5)
10	0(10,13)	0(1,5)
11	0(10,13)	0(1,5)

Fonte: Autor, 2019.

4.5.2 Montagem do Sistema de Filtração de Bancada em Geotêxtil

O sistema de filtração de bancada em geotêxtil foi utilizado para a execução dos ensaios, e construído de forma a permitir o desaguamento do resíduo, conforme o esquema ilustrado na Figura 18. 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 bquer de vidro, para posterior análise, posicionados na parte inferior (Figura 19).

Figura 18: 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)



Fonte: Autor, 2019.

4.5.3 Ensaio de Bancada em Geotêxtil

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 resíduo de estudo, 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 pol./g SST, com gradiente de mistura de 200 s^{-1} e tempo de mistura do polímero de 60 segundos,
- após a mistura do condicionante químico no jarteste as amostras foram filtradas em geotêxtil (Figura 19). No teste de bancada em geotêxtil foram realizados ensaios com duas gramaturas em tecido geotêxtil, denominado GT1 e GT2.

Figura 19: Ensaios de bancada em geotêxtil: adição de polímero na mistura rápida (1), sistema de bancada de filtração em geotêxtil (2) e desaguamento do resíduo (3)



Fonte: Autor, 2019.

- 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. O teste era finalizado quando a vazão de desaguamento ficava inferior a 0,0025 mL/segundo (inferior a 1 gota a cada 20 segundos) conforme Tominaga (2010).
- após a etapa de filtração, foi realizada a caracterização do filtrado (Tabela 4), sendo analisados os seguintes parâmetros: volume filtrado e os valores de turbidez da amostra composta.
- no encerramento de cada ensaio, foram coletados o resíduo retido no filtro geotêxtil e realizada análise de teor de sólidos conforme a descrição do método descrito na Tabela 4.

4.5.4 Análise dos Resultados dos Ensaios de Bancada em Geotêxtil

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

- Todos os dados gerados nos delineamentos experimentais, passaram pelo tratamento estatístico no *software Protimiza Experimental Design*, sendo obtido o grau de significância de cada variável pesquisada (p-valor);
- Os resultados que apresentaram significância estatística para alguma variável, o *software* elaborou um modelo matemático, que detalha as mudanças dos níveis das variáveis sobre as respostas (índice de desempenho);
- Cada modelo matemático foi submetido a análise de variância (ANOVA), se verificou a

sua adequacidade dos valores previstos com os valores experimentais;

- Validado o modelo matemático pela ANOVA, foram gerados os gráficos de superfície de resposta para cada índice de desempenho.

4.6 ETAPA IV: ENSAIOS NA INSTALAÇÃO-PILOTO DE DESAGUAMENTO EM TUBO GEOTÊXTIL

4.6.1 Planejamento Experimental da Instalação-Piloto de Desaguamento em Tubo Geotêxtil

Com a definição do melhor condicionante químico definido na Etapa III, foram realizados na Etapa IV ensaios na instalação-piloto variando o SST do resíduo, dosagem de condicionante químico de polímero e taxa de filtração.

Nessa etapa do trabalho foi realizado o Planejamento Experimental 2^3 com ponto central ou Delineamento Composto de Faces Centradas (DCFC), que teve como objetivo avaliar a influência de três variáveis conforme Figura 21.

Para variável 1 o SST do resíduo (X_1), o nível máximo (+1) de 20 g/L foi estabelecido como um valor característico das descargas de decantadores e o nível médio (0) de 10,13 g/L, como sendo típico de um tanque de mistura de água de lavagem de filtros e descargas de decantadores. O nível mínimo (-1) resultou em 0,25 g/L como valor característico da água de descarte da lavagem dos filtros.

A variável 2 os valores dos níveis para a dosagem dos polímeros (X_2) foram definidos baseado na bibliografia e testes em bancada.

Para a variável 3, inicialmente foi realizado um levantamento bibliográfico dos valores usuais utilizados no desaguamento de resíduos. Porém, não foi encontrada informação sobre taxa de filtração em artigos científicos. Sendo assim, foram considerados três faixas de vazões (vazão I: 0,37 m³/h, vazão II: 1,34 m³/h e vazão III: 2,36 m³/h) levando em conta as condições instaladas da bomba (ver detalhes da bomba na Tabela 10).

Para o dimensionamento das taxas de filtração na ETAPA IV, os *bags* ensaiados apresentavam área disponível de filtração de 0,5618 m² (dimensões do *bag* 53x53 mm). A Tabela 9 mostra as taxas de filtração utilizadas nos ensaios.

Tabela 9: Taxa de filtração utilizada nos ensaios da instalação piloto

Vazão		Taxa de Filtração	Nível
Vazão I	0,37 m ³ /h	16 m ³ .m ⁻² . dia ⁻¹	-1
Vazão II	1,34 m ³ /h	57 m ³ .m ⁻² . dia ⁻¹	0
Vazão III	2,36 m ³ /h	101 m ³ .m ⁻² . dia ⁻¹	+1

Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 10 mostra os níveis dos fatores empregados no planejamento experimental. A Tabela 11 indicam os níveis codificados e reais e os valores mínimos e máximos dos fatores estudados no planejamento experimental.

Figura 20: Representação do Planejamento Experimental com ponto central utilizado na Instalação-Piloto de Desaguamento em Tubo Geotêxtil (ETAPA IV)

Fonte: Autor, 2019.

Onde: **Variável 1:** SST do resíduo inicial (g/L); **Variável 2:** dosagem de polímero (mgPol/gSST) e **Variável 3:** taxa de filtração (m³.m⁻². dia⁻¹). Os valores mínimos e máximos são apresentados na Tabela 10.

Como resposta do planejamento experimental, foram analisados os resultados de turbidez do filtrado, eficiência de filtração, perda de partículas, porcentagem de desaguamento e teor de sólidos (%).

Tabela 10: Níveis dos fatores empregados no planejamento experimental 2³ com ponto central ou Delineamento de Faces Centradas (DFC), na instalação piloto

Nome da Variável	Código	Nível		
		-1	0	1
SST de resíduo inicial (g/L)	X ₁	0,25	10,13	20
Dosagem de polímero (mgPol/gSST)	X ₂	0,5	1,5	2,5
Taxa de filtração (m ³ .m ⁻² . dia ⁻¹)	X ₃	16	57	101

Fonte: Autor, 2019.

Foram realizados 17 experimentos na instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil na ETAPA IV, sendo três repetições no ponto central, conforme Tabela 11.

Tabela 11: Ensaio realizados no Planejamento Experimental 2³ durante IPDG na ETAPA IV

Ensaio	Variáveis		
	X ₁ SST do resíduo inicial (g/L)	X ₂ Dosagem de polímero (mgPol/gSST)	X ₃ Taxa de filtração (m ³ .m ⁻² .dia ⁻¹)
1	-1(0,25)	-1(0,5)	-1(16)
2	1(20)	1(0,5)	-1(16)
3	-1(0,25)	1(2,5)	-1(16)
4	1(20)	1(2,5)	-1(16)
5	-1(0,25)	1(0,5)	1(101)
6	1(20)	1(0,5)	1(101)
7	-1(0,25)	1(2,5)	1(101)
8	1(20)	1(2,5)	1(101)
9	-1(0,25)	0(1,5)	0(57)
10	1(20)	0(1,5)	0(57)
11	0(10,13)	1(0,5)	0(57)
12	0(10,13)	1(2,5)	0(57)
13	0(10,13)	0(1,5)	-1(16)
14	0(10,13)	0(1,5)	1(101)
15	0(10,13)	0(1,5)	0(57)
16	0(10,13)	0(1,5)	0(57)
17	0(10,13)	0(1,5)	0(57)

Fonte: Autor, 2019.

4.6.2 Montagem da instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil

Os ensaios da instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil seguiram a metodologia adaptada e descrita por Guimarães *et al.* (2014).

A instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil foi construída nas dependências da ETA 006 de Palmas (TO) consistia, basicamente, de: reservatório de 1000 L utilizado para armazenar o volume necessário para os ensaios e sucção da bomba (1), conjunto moto-bomba com inversor de frequência (2), caixa coletora de percolado (3), bolsa geossintético tecido formato cilíndrico achatado tamanho de 53x53 mm, costura sobreposta tipo “J” (4) e balde graduado (5), conforme o esquema da instalação na Figura 21.

Para a realização dos ensaios na instalação-piloto foi necessário construir uma caixa coletora do percolado com capacidade 126 litros e uma grelha para apoiar a bolsa geotêxtil (ver

Figura 22). Para o recalque das concentrações dos resíduos preparados para os ensaios, foi instalado o conjunto moto-bomba com inversor de frequência conforme Figura 23.

Figura 21: Esquema da instalação-piloto de desagramento em tubo geotêxtil



Fonte: Autor, 2019.

Figura 22: Caixa coletora do percolado: grelha para apoiar o *bag* (1), caixa coletora de percolado (2) e detalhes da montagem (3 e 4)



Fonte: Autor, 2019.

Figura 23: Detalhes do conjunto moto-bomba (1) e o sistema da instalação-piloto de desagramento (2)



Fonte: Autor, 2019.

4.6.3 Operação da instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil

Após a montagem da instalação-piloto, foram realizados inicialmente procedimentos para aferição dos equipamentos (bomba de resíduo, quadro de comando elétrico e inversor de frequência), detecção de vazamentos nos mangotes e aferição da vazão da bomba. Foram realizadas medidas volumétricas, utilizando-se provetas graduadas e cronômetro para efeito de controle das taxas empregadas.

Conforme já detalhado no item 4.6.1, os ensaios foram executados para avaliar a influência de três fatores, SST do resíduo inicial, condicionante químico e taxa de filtração. Os melhores resultados do condicionante químico nos ensaios de bancada em geotêxtil, foram utilizados nos ensaios da instalação-piloto.

Os ensaios na IP foram executados de acordo com os procedimentos:

- Para cada ensaio programado foram preparados 800 litros do resíduo, conforme planejamento experimental (ver item 4.6.1 e Figura 24);

Figura 24: Preparo do resíduo de estudo



Fonte: Autor, 2019.

- Preparar e medir o volume de resíduo e polímero necessário para cada ensaio;
- promover agitação do resíduo e posteriormente aplicar o polímero para garantir a mistura do mesmo;
- após a mistura, era ligada a bomba e acionado o cronômetro no momento inicial do desaguamento do resíduo na bolsa;
- realizou-se a coleta do percolado nos intervalos de tempo de: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 min em baldes graduados, para posterior leitura de turbidez, determinação de vazão e análise de sólidos suspensos no filtrado. Para analisar os resultados obtidos, foram calculadas

a eficiência de filtração (EF), a eficiência de desaguamento (ED), Porcentagem de Desaguamento (PD) e perda de partículas por unidade de área (PP), conforme equações, 2, 3, 4 e 6;

- o encerramento do número ciclos de enchimentos dos ensaios foram definidos no momento que o tubo geotêxtil alcançou o seu limite máximo de volume e altura. Nesse momento, era desligada a bomba e anotado o tempo de bombeamento. Para facilitar a operação dos *bags*, foi instalada na caixa coletora uma baliza para auxiliar o momento do desligamento da bomba (ver Figura 26). Vale ressaltar ainda, que nos ensaios foi adotada uma padronização para o encerramento do ciclo final de enchimento dos *bags*. Durante a operação, a bomba foi desligada no momento que o enchimento do *bag* atingisse tempo menor de 20 s ou volume bombeado inferior a 20 L;

- finalizado os ensaios de desaguamento na instalação-piloto, as bolsas de geotêxtil foram acomodadas em local apropriado para monitoramento diário do teor de sólidos até atingir valores acima de 90% (ver Figura 26).

Figura 25: Detalhes da instalação-piloto: Conjunto moto-bomba de 2 cv (1), sistema liga/desliga e inversor de frequência (2), caixa coletora e fita com indicação da altura máxima tubo geotêxtil (3).



Fonte: Autor, 2019.

4.6.3 Curva de secagem no interior do tubo geotêxtil

Conforme planejamento experimental detalhado no item 4.6.1, após o encerramento do ciclo de enchimento na instalação-piloto, foi realizado o monitoramento do teor de sólidos no interior dos 17 *bags*. Foram realizadas coletas diárias em cada *bag* e o tempo de encerramento do monitoramento foi definido quando o teor de sólidos atingisse valores acima de 90%. Os *bags* foram dispostos sobre uma manta em PEAD (Figura 26).

Figura 26: Local utilizado para secagem dos *bags* de geotêxtil, após os ensaios na instalação-piloto



Fonte: Autor, 2019.

4.6.4 Análise dos resultados dos ensaios da instalação-piloto

O processo de tratamento estatístico dos dados gerados nos ensaios da instalação-piloto, e a forma de avaliação e validação dos resultados, teve o seguinte roteiro:

- todos os dados gerados nos delineamentos experimentais, passaram pelo tratamento estatístico no *software Protimiza Experimental Design*, sendo obtido o grau de significância de cada variável pesquisada (p-valor);
- para os resultados que apresentaram significância estatística para alguma variável, o *software* elaborou um modelo matemático, que detalha as mudanças dos níveis das variáveis sobre as respostas (índices de desempenho);
- cada modelo matemático foi submetido a análise de variância (ANOVA), se verificou a sua adequacidade dos valores previstos com os valores experimentais;
- validado o modelo matemático pela ANOVA, foram gerados os gráficos de superfície de resposta para cada índice de desempenho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

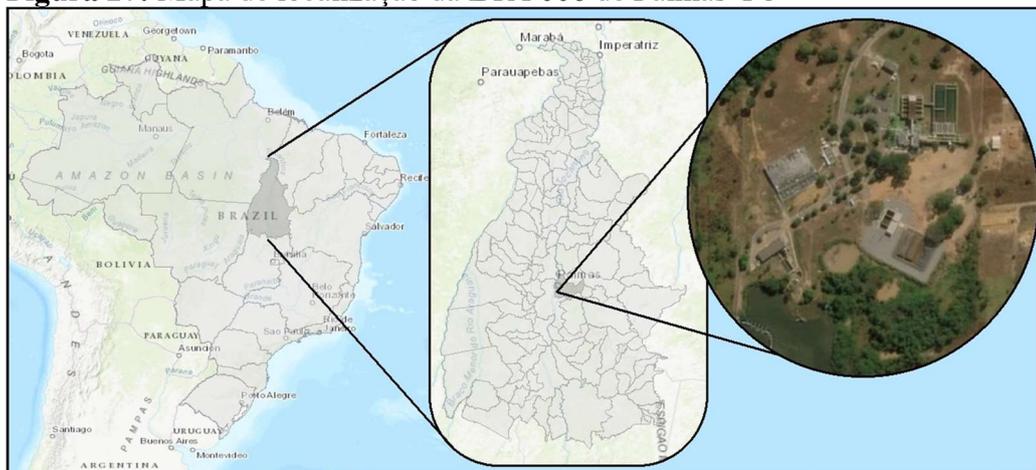
No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de desaguamento. No item 5.1 descreve o sistema de tratamento de água e dos resíduos da ETA 006, o item 5.2 mostra os resultados da caracterização dos resíduos. O item 5.3 apresenta os ensaios de bancada em geotêxtil e no item 5.4 os ensaios na instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil.

5.1 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DA ETA 006

5.1.1 Caracterização do sistema de tratamento de água da ETA

A ETA 006 é de Ciclo Completo com unidades de coagulação, floculação, decantação e filtração, que atende cerca de 85% da demanda total da cidade de Palmas-TO. A ETA, atualmente, opera com vazão média variando de 600 L/s à 800 L/s com período de funcionamento diário de 20 a 22 h, atendendo cerca de 224.817 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 27 ilustra o mapa de localização das unidades de tratamento e a Figura 28 mostra foto aérea da ETA 006.

Figura 27: Mapa de localização da ETA 006 de Palmas-TO



Fonte: Autor, 2019.

Figura 28: Foto aérea da ETA 006 de Palmas-TO



Fonte: Autor, 2019.

5.1.1.1 Captação de Água Bruta

O Ribeirão Taquaruçu se destaca por ser responsável pelo abastecimento de aproximadamente 67% da demanda atual de Palmas e, segundo o monitoramento realizado nos últimos cinco anos pela BRK Ambiental/Saneatins, esse manancial apresentou um pico de vazão máxima de 6.647 L/s em maio de 2015, entretanto, em agosto de 2016 foi observado um valor crítico de 71 L/s, com redução de 81,7% da vazão comparada com o mesmo período de 2015. Como solução alternativa, a ETA 006, no período de seca (julho a outubro), realiza captação de água bruta no braço do reservatório da Usina Luiz Eduardo Magalhães (UHE Lajeado) com objetivo de complementar a produção de água tratada. Portanto, neste trabalho, o resíduo coletado do decantador da ETA 006 no período de abril de 2018 foi proveniente do sistema de captação do Ribeirão Taquaruçu.

A captação superficial da ETA 006 é constituída de uma barragem de nível que alimenta um canal de concreto com gradeamento e caixa de areia onde se encontra a tomada d'água da Estação Elevatória de Água Bruta (EEAB). A EEAB é responsável pelo bombeamento da água bruta da tomada d'água para o início do tratamento da ETA, conforme ilustrado na Figura 29.

Segundo informações levantadas no Laboratório de Controle Ambiental da BRK Ambiental/Saneatins, a Tabela 12 apresenta os resultados da caracterização físico-química e biológica do Ribeirão Taquaruçu realizada no período de 10 a 13 de abril de 2018. Comparando-se os resultados obtidos com os valores máximos permitidos pelo Conama 357/2005, padrão para

águas de Classe 02, observa-se que os parâmetros alumínio dissolvido e o ferro dissolvido resultaram valores acima do preconizado pela legislação.

Figura 29: Captação superficial da ETA 006: barragem de nível (1), tomada de água (2), gradeamento (3), gradeamento (3), canal de tomada de água (4), caixa de areia (5), elevatória de água bruta (6)



Fonte: Autor, 2019.

Tabela 12: Características físico-química e biológica da Água Bruta do Ribeirão Taquaruçu no período de 10 a 13 de abril de 2018

Parâmetro	Unidade	Resultado
Alumínio dissolvido	mg/L	0,0998 a 0,113
Coliformes Totais	NMP/100 mL	24190 a >24200
Clorofila a	µg/L	<1
Contagem de Cianobactérias	ceL/mL	<3 a 69
<i>Geitlerinema sp</i>	ceL/mL	69
Cor verdadeira	uH	7 a 10,1
DBO	mg/L	<3
DQO	mg/L	5,3 a 5,9
Escherichia coli quantitativa	NMP/100 mL	305 a 336
Ferro dissolvido	mg/L	0,637 a 0,709
Fósforo	mg/L	<0,001 a 0,007
pH (a 25°C)	-	6,26 a 6,31
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	23 a 86
Manganês	mg/L	0,0323 a 0,0483
Nitrato	mg/L	<0,5
Nitrito	mg/L	<0,02
Nitrogênio amoniacal	mg/L	<0,1
Sulfato	mg/L	<0,5
Sulfeto	mg/L	<0,002
Turbidez	uT	28,4 a 350

Fonte: BRK Ambiental/Saneatins (2018)

5.1.1.2 Caixa de chegada de água bruta

A água bruta captada no Ribeirão Taquaruçu é direcionada para um caixa de chegada localizada no início do sistema de tratamento. Após a chegada, encontra-se instalado um vertedor retangular, após o qual ocorre aplicação da suspensão de cal (quando necessária), conforme Figura 31.

Figura 30: Caixa de chegada da água bruta (1) e a tubulação de distribuição de suspensão de cal hidratada (2)



Fonte: Autor, 2019.

5.1.1.3 Mistura rápida

A mistura rápida é realizada na garganta do vertedor parshal (com garganta de largura, $w = 1,83$ m) para o qual, com descarga livre, podem ser medidas vazões entre 73,6 e 2 939,8 L/s. Esse vertedor cumpre duas funções: medir a vazão afluyente à ETA e promover a mistura rápida (ver Figura 32).

Conforme dados operacionais da BRK Ambiental/Saneatins (2018), foram levantados os valores de vazão afluyente da estação de tratamento de água no período de 10 a 13 de abril de 2018. Observa-se na Tabela 13 a vazão da ETA 006 variou de 590 L/s a 747,2 L/s, conforme demanda do sistema

A Tabela 14 são apresentadas as condições operacionais da mistura rápida, dosagem de sulfato de alumínio líquido, pH de coagulação e os resultados de monitoramento da turbidez da água bruta na entrada do sistema. Observar-se que no dia 11/04/2018 foi registrado nos boletins de monitoramento da BRK Ambiental/Saneatins precipitação na captação do Ribeirão Taquaruçu o que ocasionou um pico de 350 uT e conseqüentemente houve um aumento do consumo sulfato

de alumínio líquido. Já o pH de coagulação (6,56 a 7,28) manteve-se na faixa recomendada para promover coagulação química.

Tabela 13: Vazão (L/s) na ETA 006 no período de 10 a 13 de abril de 2018

Período	Vazão Mínima	Vazão Média	Vazão Máxima
10/04/2018	602,7	643,2	702,7
11/04/2018	592,5	616,4	645,0
12/04/2018	613,8	682,2	747,2
13/04/2018	590,0	645,8	725,0

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 14: Condições operacionais da ETA 006 (turbidez, dosagem e pH de coagulação) no período de 10 a 13 de abril de 2018

Período	Turbidez da água bruta (uT)			Dosagem de alumínio líquido (mg/L)			pH de Coagulação		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
10/04/18	47	81	181	2,35	3,45	5,48	6,56	6,78	7,00
11/04/18	108	197	350	3,62	6,66	8,81	6,78	6,92	7,28
12/04/18	47	64	103	3,00	3,25	3,65	6,78	6,84	6,95
13/04/18	40	44	49	1,09	1,74	3,15	6,80	6,88	6,97

Fonte: Autor, 2019.

Figura 31: Vertedor Pashall (vista a jusante)



Fonte: Autor, 2019.

5.1.1.4 Unidade de floculação

As unidades de floculação são formado por dois módulos em paralelo. Cada conjunto de floculação alimenta um decantador, embora, por meio de uma comporta localizada no canal geral de água floculada, haja possibilidade de encaminhar a água de uma unidade de floculação ao outro decantador.

Cada conjunto é composto de 4 câmaras de floculação, sendo que a 1ª e 2ª câmaras são providas de agitadores de turbina (Figura 32). Já a 3ª e 4ª câmaras são agitadores de paletas paralelas ao eixo vertical. O conjunto de floculação apresenta as seguintes dimensões:

- base quadrada (em planta) de cada câmara com lado igual a 5,9 m;
- profundidade útil de 3,65 m;
- volume útil por conjunto de 127 m³;
- o tempo de floculação total resultante para a vazão máxima de 350 L/s é dado por: Vazão 350 L/s – $T_f = 24,0$ min
- gradientes de velocidade de 30 a 70 s⁻¹ (primeira câmara), 20 a 50 s⁻¹ (segunda câmara), 15 a 40 s⁻¹ (terceira câmara), 15 a 30 s⁻¹ (quarta câmara).

Figura 32: Unidade de floculação com dois conjuntos mecanizados com 4 câmaras em série



Fonte: Autor, 2019.

5.1.1.5 Unidade de decantação

Na ETA 006 há um decantador para cada conjunto de floculação, sendo, portanto, dois decantadores no módulo de tratamento. Os decantadores são do tipo convencional, com escoamento horizontal e remoção mecanizada de resíduo, e apresentam as seguintes características principais:

- comprimento útil de 40 m;
- profundidade útil de 4,2 m;
- largura de 12 m;
- área em planta de 480 m²;
- volume útil de 2016 m³;
- taxa de escoamento superficial igual a 45 m³/m²d;
- tempo médio de detenção 2 h e 14 min;
- velocidade horizontal média de escoamento de 0,5 cm/s;
- cortina perfurada contendo 300 orifícios de 8 cm de diâmetro;
- coleta de água decantada realizada por meio de 8 calhas de 6,75 m de comprimento, 0,35 m de largura e 0,27 m de altura, providas de placas com vertedores triangulares (ver Figura 34).

Os decantadores possuem raspadores de resíduos mecanizado (ver Figura 33), responsáveis pela raspagem e acumulação do resíduo aos poços de lodo. Conforme informações levantadas na BRK Ambiental/Saneatins, o Decantador I e II realiza em média três descargas diárias de resíduos distribuídas no período matutino, vespertino e noturno.

Segundo Hidrosan (2011) foram levantadas as concentrações médias de amostra composta de SST resultantes nos três pontos de descarga de cada decantador da ETA 006, conforme apresentada na Tabela 15.

Tabela 15: Sólidos suspenso total nas descargas dos decantadores I e II

Ponto de Descarga	SST (mg/L)	
	Decantador I	Decantador II
Ponto I	20.896,5	5030,1
Ponto II	1464,8	393,3
Ponto III	13.523,5	299,9

Fonte: (Hidrosan, 2011)

Com base nos resultados na Tabela 15, o relatório da Hidrosan (2011) identificou que o acúmulo de resíduo foi muito maior no decantador I em relação ao decantador II, fato que pode

decorrente de distribuição de vazão não equitativa aos decantadores, com maior vazão sendo encaminhada ao decantador I.

Figura 33: Unidade de decantação: canal de entrada de água floculada no decantador (1), cortina distribuidora (2), calhas de coleta de água decantada (3), raspadora de resíduo (4), vista aérea do decantador I e II (5) e tubulação de descarga de l resíduo (6)



Fonte: Autor, 2019.

5.1.1.6 Unidade de filtração

A ETA 006 possui 8 filtros rápidos por gravidade (ver Figura 34), com fundo provido de bocais especiais para lavagem com ar e água e meio filtrante constituído unicamente de areia, funcionando segundo o princípio da taxa declinante variável e apresentando as seguintes características principais:

- comprimento de 7,60 m;
- largura da câmara filtrante de 3,80 m;
- área da câmara filtrante de 28,88 m²;
- profundidade útil de 3,20 m;

- taxa média de filtração de $249,30 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$;
- espessura da camada filtrante de $0,80 \text{ m}$;
- calhas de coleta de água de lavagem descarregando em canal lateral, situado ao longo do comprimento da câmara filtrante;
- disposição das unidades filtrantes: 3 de cada lado do corredor de comando;
- saída dos filtros por meio de caixas individuais, providas de vertedor retangular com descarga livre.

Todas as unidades são automatizadas, onde cada filtro possui uma mesa de comando individualizada. Atualmente, as lavagem dos filtros ocorrem no intervalo de tempo de 48 horas em modo escalado, proporcionando uma melhor eficiência na operação do sistema.

Figura 34: Sistema de filtração com taxa declinante variável: vista lateral dos filtros (1), filtros em operação (2), caixa de saída com vertedor (3), tubulação de água e de ar (4)



Fonte: Autor, 2019.

A rotina de lavagem dos filtros levantada na Brk Ambiental/Sanetins no período de abril de 2018, pode ser descrita assim:

- Ar e água durante 5 a 6 min, com vazão de água da ordem de $5,87 \text{ m}^3/\text{min}$;
- Água durante 4 a 6 min, com vazão da ordem de $22,2 \text{ m}^3/\text{min}$;
- Duração das carreiras de filtração: 42 a 84 h, considerando o funcionamento da ETA por 21 h com vazão média de $550 \text{ a } 700 \text{ L/s}$.

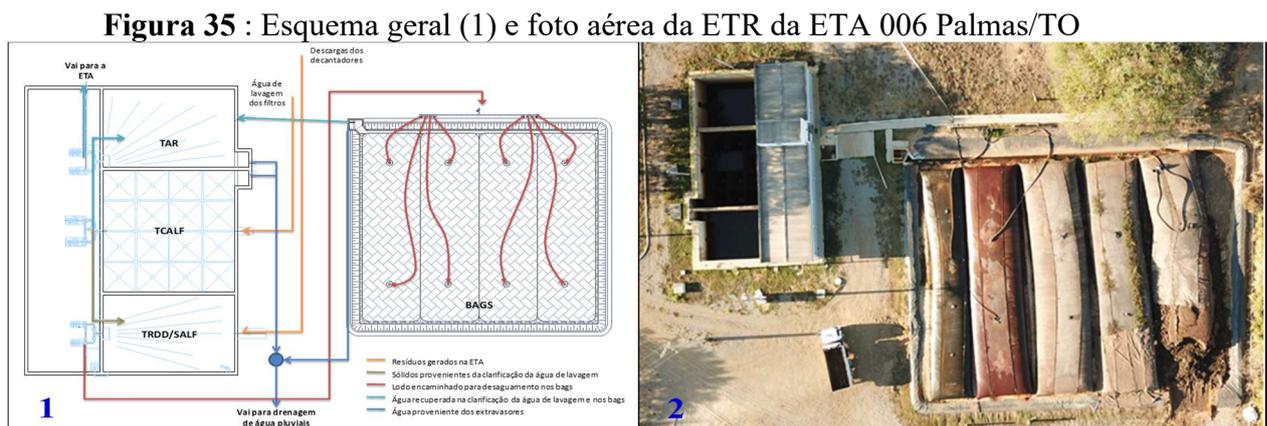
5.1.2 SISTEMA DE TRATAMENTO DOS RESÍDUOS NA ETA 006

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), tendo como interesse o direcionamento da água recuperada após o tratamento, para o início do sistema da ETA.

5.1.2.1 Funcionamento do sistema de tratamento de resíduos da ETA 006

Segundo Hidrosan Engenharia (2011), o sistema de tratamento foi projetado para tratar os resíduos gerados da ETA 066 com vazão máxima de 700 L/s. As unidades 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), Sistema de Desaguamento de resíduo em *Bags* de Geotêxtil e Tanque de Água Recuperada (TAR). A Figura 35 mostra um esquema geral e uma foto aérea da estação de tratamento de resíduos (ETR).

O sistema conta também com uma unidade de apoio composta por uma casa de bomba (pavimento inferior), uma casa de química (pavimento superior) e um laboratório (pavimento superior). Esse sistema possibilita a recuperação de água clarificada, sendo ela encaminhada para o início do tratamento da ETA 006.



Fonte: (Hidrosan Engenharia, 2011)

O TCALF opera em batelada, recebendo e clarificando a água proveniente da lavagem dos filtros (Figura 36). 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 a água clarificada para o TAR. A Figura 36 ilustra os poços de resíduo do tanque de clarificação.

Figura 36: Poços de resíduo do TCA LF.



Fonte: Autor, 2019.

O TRDD/SALF regulariza e homogeniza as descargas dos decantadores com o sedimento da água de lavagem dos filtros (Figura 37). O TRDD/SALF possui um agitador elétrico submerso, tendo como função a agitação do resíduo armazenado e, por consequência, a homogenização do resíduo.

Figura 37: Entrada das descargas dos decantadores 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 apenas três se encontram instalados. Os *bags* recebem o resíduo proveniente do TRDD/SALF, efetuando desaguamento do mesmo.

A operação dos *bags* é efetuada de forma que o resíduo homogeneizado é armazenado no TRDD/SALF é encaminhado para um dos *bags* até que o seu volume máximo seja atingido. Nesse momento, o outro *bag* disponível recebe o resíduo, enquanto ocorre o desaguamento do resíduo no *bag* anterior. A Figura 38 mostra o *bag* instalado no sistema de tratamento dos resíduos.

Figura 38: *Bag* geotêxtil instalado no sistema de tratamento dos resíduos da ETA 006



Fonte: Autor, 2019.

Na semana que foi realizada a coleta do resíduo no decantador da ETA 006 (10 a 13 de abril/ 2018), o setor de operação da Companhia de Saneamento estava realizando o descarte do resíduo do *Bag* (Figura 39). Conforme levantamento na BRK Ambiental/Saneatins, em Janeiro de 2018 foi finalizada operação o *bag* e o seu descarte foi programado após 90 dias de secagem. Sendo assim, foram coletadas no dia 13/04/2018 três amostras no interior do *bag* (Figura 39) com objetivo de verificar o teor de sólidos em escala real. A Tabela 16 mostra os resultados do teor sólidos coletado no interior do *Bag* da ETA 006.

Tabela 16: Teor de umidade coletado no interior do *Bag* da ETA 006

Pontos de Coletas no interior do <i>Bag</i> (ver Figura 43)	Teor de Sólidos (%)
Ponto 1: Parte superior do <i>Bag</i>	26
Ponto 2: Centro do <i>Bag</i>	20
Ponto 3: Parte inferior do <i>Bag</i>	30

Fonte: (Brk Ambiental/Saneatins, 2018)

Figura 39: Pontos de coletas de resíduo no interior do *Bag* da ETA 006 para análise do teor de sólidos

Fonte: Autor, 2019.

5.2 ETAPA II: PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA ETA 006

5.2.1 Preparo e Caracterização dos Resíduos de Estudo

Na Tabela 17 são apresentados os volumes necessários de “Resíduo Mãe” e da água filtrada da ETA 006 utilizada para obter as concentrações desejadas para os ensaios.

Tabela 17: Volume de resíduos de estudo preparado a partir do resíduo mãe

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

Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 18 mostra os resultados dos parâmetros físico-químico analisados para caracterizar o “Resíduo Mãe” e as três amostras preparadas de resíduo de estudo (RE 1, 2 e 3) utilizada nos ensaios de bancada e na instalação-piloto.

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

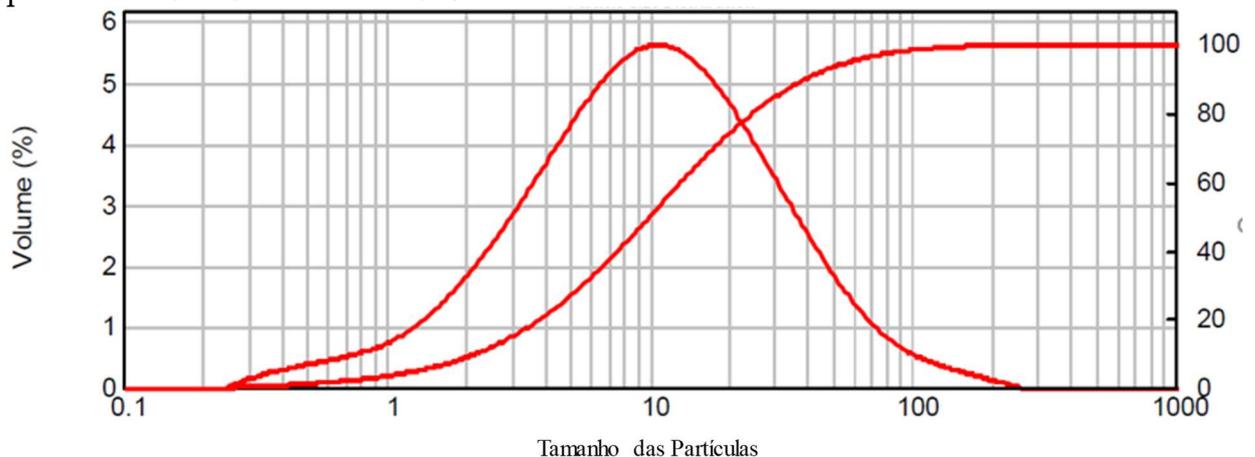
Tabela 18: Características físico-química dos resíduos de estudo

Parâmetro	Resíduo Mãe	RE 1 (20 g/L)	RE 2 (10,13 g/L)	RE 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, 2019.

A Figura 40 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 apresenta 15% de fração argila ($< 2 \mu\text{m}$), 55% de fração silte ($2 < x < 60 \mu\text{m}$) e 30% de fração areia fina ($60 < x < 200 \mu\text{m}$).

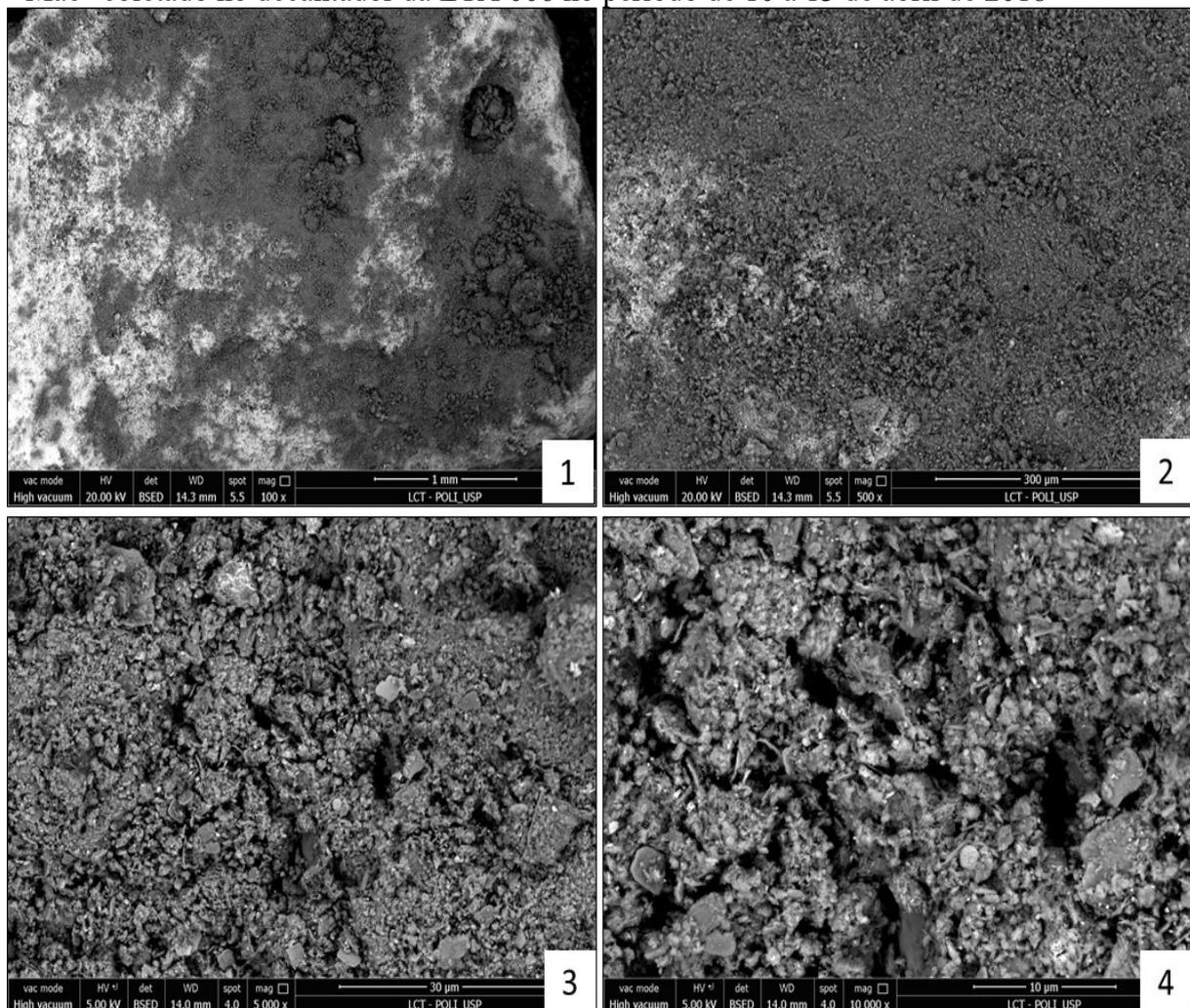
Figura 40: Curva granulométrica do “Resíduo Mãe” coletado no decantador da ETA 006 no período de 10 a 13 de abril de 2018



Fonte: Autor, 2019.

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 41 e 42.

Figura 41: Micrografias obtidas por imagem de microscopia de varredura eletrônica do “Resíduo Mãe” coletado no decantador da ETA 006 no período de 10 a 13 de abril de 2018



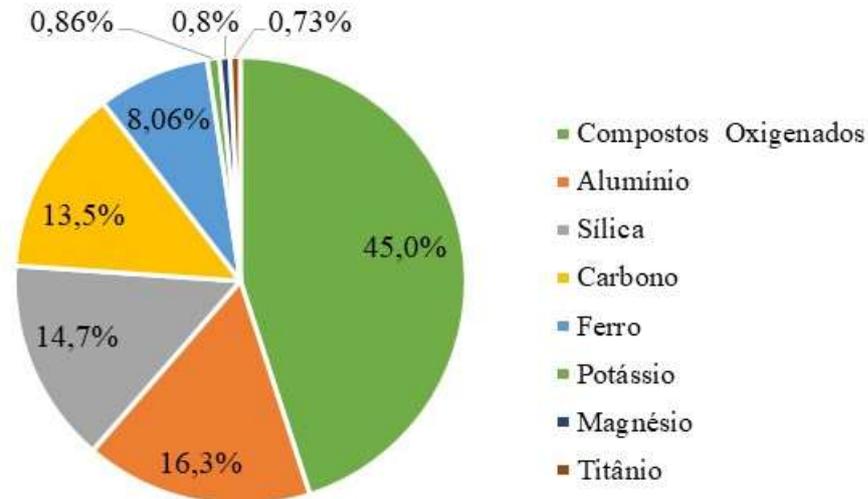
(1) aumento de 100x; (2) aumento de 500x; (3) aumento de 5.000x; (4) aumento de 10.000x

Fonte: Autor, 2019.

Observa-se na Figura 42 que a morfologia do “Resíduo Mãe” apresentou superfície com aspecto irregular e composição heterogênea de partículas.

A análise qualitativa dos elementos constituintes do “Resíduo Mãe”, obtidas pelo método de Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (EDS), é apresentada na Figura 43.

Figura 42: Análise qualitativa dos elementos químicos constituintes na parte sólida do “Resíduo Mãe, usando o método EDS da microscopia eletrônica



Fonte: autor, 2019.

A Figura 42 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 (SiO_2) que pode estar associado a à presença de areia na água bruta (encontrados em minerais, areias e silicatos), o óxido de alumínio (Al_2O_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 Fe_2O_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.

5.3 ETAPA III ENSAIOS DE BANCADA EM GEOTÊXTIL

5.3.1 Resultados do Delineamento Composto de Faces Centradas 2² (DCFC) nos Ensaio de Bancada com Geotêxtil

Nas Tabelas 19, 20 e 21 estão apresentados os resultados da matriz dos ensaios com os valores codificados e os valores reais (entre parênteses) das variáveis estudadas, bem como as respostas observadas (turbidez do filtrado e tempo de desaguamento) para GT1 e GT2. 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 (SST no resíduo inicial) e X_2 (dosagem de polímero).

Tabela 19: Delineamento composto de face centrada e réplicas nos pontos centrais em valores codificados e valores reais (entre parênteses) e respostas observadas para o GT1 e GT2 (turbidez do filtrado e tempo de desaguamento) com o Polímero Catiônico

Ensaio	Variáveis		Polímero Catiônico			
			GT1 (abertura 200 µm)		GT2 (abertura 400 µm)	
	SST do resíduo inicial (g/L)	Dosagem de Polímero (mgP/gSST)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo de desaguamento (s)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo de desaguamento (s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,50)	403	10	556	10
2	1 (20)	-1 (0,50)	1.618	1411	20.150	302
3	-1 (0,25)	1 (2,50)	174	190	310	257
4	1 (20)	1 (2,50)	57,5	421	14.500	12
5	-1 (0,25)	0 (1,5)	205	217	104	462
6	1 (20)	0 (1,5)	46,3	667	13.000	10
7	0 (10,13)	-1 (0,50)	718	1093	6.750	96
8	0 (10,13)	1 (2,50)	27,60	670	350,5	343
9	0 (10,13)	0 (1,5)	50,40	1040	2.620	319
10	0 (10,13)	0 (1,5)	52,90	1042	2.500	217
11	0 (10,13)	0 (1,5)	54,60	1048	2.100	351

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 20: Delineamento composto de face centrada e réplicas nos pontos centrais em valores codificados e valores reais (entre parênteses) e respostas observadas para o GT1 e GT2 (turbidez do filtrado e tempo de desaguamento) com o Polímero Aniônico (continua)

Ensaio	Variáveis		Polímero Aniônico			
			GT1 (abertura 200 µm)		GT2 (abertura 400 µm)	
	SST do resíduo inicial (g/L)	Dosagem de Polímero (mgP/gSST)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo de desaguamento (s)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo de desaguamento (s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,50)	161	419	371	10
2	1 (20)	-1 (0,50)	92,9	1189	302	441

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 20: Delineamento composto de face centrada e tréplicas nos pontos centrais em valores codificados e valores reais (entre parênteses) e respostas observadas para o GT1 e GT2 (turbidez do filtrado e tempo de desaguamento) com o Polímero Aniônico (continua)

Ensaio	Variáveis		Polímero Aniônico			
			GT1 (abertura 200 µm)		GT2 (abertura 400 µm)	
	SST do resíduo inicial (g/L)	Dosagem de Polímero (mgP/gSST)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo de desaguamento (s)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo de desaguamento (s)
3	-1 (0,25)	1 (2,50)	131	499	267	17
4	1 (20)	1 (2,50)	80,8	949	113	382
5	-1 (0,25)	0 (1,5)	103	625	304	14
6	1 (20)	0 (1,5)	49,20	657	142	269
7	0 (10,13)	-1 (0,50)	37,4	1341	539	238
8	0 (10,13)	1 (2,50)	70,80	1183	141	470
9	0 (10,13)	0 (1,5)	55,9	1174	157	408
10	0 (10,13)	0 (1,5)	54,4	1215	87,3	453
11	0 (10,13)	0 (1,5)	51,9	1010	57,6	495

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 21: Delineamento composto de face centrada e tréplicas nos pontos centrais em valores codificados e valores reais (entre parênteses) e respostas observadas para o GT1 e GT2 (turbidez do filtrado e tempo de desaguamento) com Polímero Não-Iônico

Ensaio	Variáveis		Polímero Não-Iônico			
			GT1 (abertura 200 µm)		GT2 (abertura 400 µm)	
	SST do resíduo inicial (g/L)	Dosagem de Polímero (mgP/gSST)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo de desaguamento (s)	Turbidez do filtrado (uT)	Tempo de desaguamento (s)
1	-1 (0,25)	-1 (0,50)	275	331	493	8
2	1 (20)	-1 (0,50)	577	2.041	19.780	359
3	-1 (0,25)	1 (2,50)	113	722	291	11
4	1 (20)	1 (2,50)	49,60	1556	2.320	589
5	-1 (0,25)	0 (1,5)	124	970	283	9
6	1 (20)	0 (1,5)	101	2.380	12.480	462
7	0 (10,13)	-1 (0,50)	134	1.966	5.120	175
8	0 (10,13)	1 (2,50)	98,60	1.765	1.594	251
9	0 (10,13)	0 (1,5)	81,50	1.882	4.060	196
10	0 (10,13)	0 (1,5)	102	1.660	4.360	270
11	0 (10,13)	0 (1,5)	119	1.854	3.960	211

Fonte: Autor, 2019.

As Tabelas 22, 23 e 24 mostram o tratamento estatístico para os dados de Turbidez do Filtrado e o Tempo de Desaguamento para os três polímeros pesquisados. Valores de p-valor abaixo de 0,100 indicam que houve efeito estatístico das variáveis (X_1 ou X_2) nas respostas estudadas, a nível de confiança de 90%.

Tabela 22: Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para GT1 e GT2 (turbidez do filtrado e tempo de desaguamento) com Polímero Catiônico

GT1 Polímero Catiônico									
Turbidez do Filtrado (uT)					Tempo de Desaguamento (s)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
média	29,25	99,98	0,29	0,7816	média	995,37	63,90	15,58	<0,0010*
X _{1(L)}	156,63	79,57	1,97	0,1061	X _{1(L)}	347,00	50,85	6,82	0,0010*
X _{1(Q)}	133,97	122,45	1,09	0,3238	X _{1(Q)}	-481,42	78,26	-6,15	0,0017*
X _{2(L)}	-413,32	79,57	-5,19	0,0035*	X _{2(L)}	-205,50	50,85	-4,04	0,0099*
X _{2(Q)}	381,12	122,45	3,11	0,0265*	X _{2(Q)}	-41,92	78,26	-0,54	0,6152
X _{1 x X2}	-332,88	97,45	-3,42	0,0189*	X _{1 x X2}	-292,50	62,28	-4,70	0,0054*

GT2 Polímero Catiônico									
Turbidez do Filtrado (uT)					Tempo de Desaguamento (s)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
média	2157,53	737,22	2,93	0,0328	média	298,74	75,86	3,94	0,0110*
X _{1(L)}	7780,00	586,70	13,26	<0,0010*	X _{1(L)}	-67,50	60,37	-1,12	0,3143
X _{1(Q)}	4768,18	902,91	5,28	0,0032*	X _{1(Q)}	-67,34	92,90	-0,72	0,5010
X _{2(L)}	-2049,25	586,70	-3,49	0,0174*	X _{2(L)}	34,00	60,37	0,56	0,5976
X _{2(Q)}	1766,43	902,91	1,96	0,1078	X _{2(Q)}	-83,84	92,90	-0,90	0,4082
X _{1 x X2}	-1351,00	718,55	-1,88	0,1189	X _{1 x X2}	-134,25	73,93	-1,82	0,1291

* $p \leq 0,10$; L- termos lineares; Q- termos quadráticos

Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 22 apresenta os coeficientes de regressão estimados, o desvio padrão, o teste t e o p-valor para a resposta de turbidez do Filtrado e Tempo de desaguamento para o GT1 e o GT2.

Por meio da Tabela 22, observa-se que a média e os termos lineares e quadráticos do SST do resíduo inicial (X₁) não foram estatisticamente significativos ($p > 0,10$) para turbidez do filtrado no GT1. Verifica-se ainda que são significativos ($p < 0,10$) somente termos lineares e quadráticos da variável X₂ (dosagem de polímero) e as interações entre as variáveis (X_{1 x X2}). Analisando o GT2, somente as variáveis X₁ (termos lineares e quadráticos) e X₂ (termos lineares) apresentaram efeito estatístico para as faixas estudadas.

Para resposta do tempo de desaguamento, os valores de p-valor obtidos no GT1 na média, em termos lineares e quadráticos, e a variável X₂, em termos lineares, e as interações entre as variáveis apresentaram significância ($p < 0,10$). Para o GT2, os termos lineares e quadráticos do tempo de desaguamento não apresentaram nenhum efeito estatístico das duas variáveis avaliadas com polímero catiônico.

Tabela 23: Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para GT1 e GT2 (turbidez do filtrado e tempo de desaguamento) com Polímero Aniônico

GT1									
Polímero Aniônico									
Turbidez do Filtrado (uT)					Tempo de Desaguamento (s)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
média	45,58	10,34	4,41	0,0070*	média	1134,26	84,90	13,36	<0,0010*
X _{1(L)}	-28,68	8,23	-3,49	0,0175*	X _{1(L)}	208,67	67,56	3,09	0,0272*
X _{1(Q)}	43,24	12,66	3,41	0,0190*	X _{1(Q)}	-495,16	103,98	-4,76	0,0050*
X _{2(L)}	-1,45	8,23	-0,18	0,8670	X _{2(L)}	-53,00	67,56	-0,78	0,4683
X _{2(Q)}	21,24	12,66	1,68	0,1543	X _{2(Q)}	125,84	103,98	1,21	0,2803
X _{1 x X₂}	4,47	10,08	0,44	0,6756	X _{1 x X₂}	-80,00	82,75	-0,97	0,3781

GT2									
Polímero Aniônico									
Turbidez do Filtrado (uT)					Tempo de Desaguamento (s)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
média	142,553	52,406	2,720	0,0418*	média	416,42	51,72	8,05	0,0005*
X _{1(L)}	-64,167	41,706	-1,539	0,1845	X _{1(L)}	175,17	41,16	4,26	0,0080*
X _{1(Q)}	17,568	64,184	0,274	0,7952	X _{1(Q)}	-221,55	63,35	-3,50	0,0173*
X _{2(L)}	-115,167	41,706	-2,761	0,0398*	X _{2(L)}	30,00	41,16	0,73	0,4988
X _{2(Q)}	134,568	64,184	2,097	0,0901*	X _{2(Q)}	-9,05	63,35	-0,14	0,8919
X _{1 x X₂}	-21,250	51,079	-0,416	0,6946	X _{1 x X₂}	-16,50	50,41	-0,33	0,7567

* $p \leq 0,10$; L- termos lineares; Q- termos quadráticos.

Fonte: Autor, 2019.

Observa-se, na Tabela 23, que o resultado p-valor da média e os termos lineares e quadráticos do SST do resíduo inicial (X_1) foram estatisticamente significativos ($p < 0,10$) para remoção de turbidez do filtrado com polímero aniônico no GT1. Já os resultados dos termos lineares e quadráticos da variável X_2 (dosagem de polímero) e as interações entre as variáveis não apresentaram significância ($p > 0,10$). Para o GT2, no que se refere à turbidez do filtrado, que utilizou polímero aniônico (Tabela 23), o resultado p-valor foi estatisticamente significativo ($p < 0,10$) somente para a média e os termos lineares e quadráticos da dosagem do polímero (X_2). Sendo assim, os efeitos do X_1 e suas interações não favoreceram a remoção da turbidez nas condições avaliadas.

Para resposta do tempo de desaguamento, os valores de p-valor obtidos no GT1 e GT2, em termos lineares e quadráticos, apresentaram significância somente para variável X_1 . Entretanto, para variável X_2 , os termos lineares e quadráticos do tempo de desaguamento não apresentaram nenhum efeito estatístico no GT1 e GT2 com polímero aniônico.

Tabela 24: Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para GT1 e GT2 (turbidez do filtrado e tempo de desaguamento) com Polímero Não-Iônico

GT1									
Polímero Não-Iônico									
Turbidez do Filtrado (uT)					Tempo de Desaguamento (s)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
média	74,37	50,95	1,46	0,2042	média	1920,6	116,0	16,6	<0,0010*
X ₁ (L)	35,93	40,55	0,89	0,4161	X ₁ (L)	659,0	92,3	7,1	0,0008
X ₁ (Q)	77,82	62,40	1,25	0,2676	X ₁ (Q)	-428,6	142,0	-3,0	0,0295
X ₂ (L)	-120,80	40,55	-2,98	0,0308*	X ₂ (L)	-49,2	92,3	-0,5	0,6170
X ₂ (Q)	81,62	62,40	1,31	0,2478	X ₂ (Q)	-238,1	142,0	-1,7	0,1545
X ₁ x X ₂	-91,35	49,66	-1,84	0,1252	X ₁ x X ₂	-219,0	113,0	-1,9	0,1104

GT2									
Polímero Não-Iônico									
Turbidez do Filtrado (uT)					Tempo de Desaguamento (s)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
média	4103,68	735,02	5,58	0,0025*	média	221,68	14,29	15,52	<0,0010*
X ₁ (L)	5585,50	584,94	9,55	0,0002*	X ₁ (L)	230,33	11,37	20,26	<0,0010*
X ₁ (Q)	2312,29	900,21	2,57	0,0501*	X ₁ (Q)	19,79	17,50	1,13	0,3093
X ₂ (L)	-3531,31	584,94	-6,04	0,0018*	X ₂ (L)	51,50	11,37	4,53	0,0062*
X ₂ (Q)	-712,21	900,21	-0,79	0,4647	X ₂ (Q)	-2,71	17,50	-0,15	0,8829
X ₁ x X ₂	-4314,50	716,41	-6,02	0,0018*	X ₁ x X ₂	56,75	13,92	4,08	0,0096*

* $p \leq 0,10$; L- termos lineares; Q- termos quadráticos.

Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 24 mostra que o resultado p-valor da média e os termos lineares e quadráticos do SST do resíduo inicial (X_1) e termos quadráticos da dosagem de polímero (X_2) não foram estatisticamente significativos ($p > 0,10$) para remoção de turbidez do filtrado com polímero não aniônico no GT1. Para esse ensaio, somente o termo linear do X_2 apresentou $p < 0,10$.

Para o GT2, no que diz respeito à turbidez do filtrado (Tabela 24), os resultados do p-valor da média e os termos lineares e quadráticos da dosagem do polímero X_1 e lineares do X_2 foram estatisticamente significativos ($p < 0,10$).

Para resposta do tempo de desaguamento, os valores de p-valor obtidos no GT1, em termos lineares e quadráticos, não apresentaram significância para variável X_1 e X_2 . Verifica-se ainda que no GT2 os valores obtidos são significativos ($p < 0,10$) somente quanto à média, os termos lineares das duas variáveis (X_1 e X_2) e suas interações ($X_1 \times X_2$), conforme apresentado na Tabela 24.

Considerando somente os parâmetros com significância estatística ($p\text{-valor} \leq 0,10$), 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) do Polímero Catiônico. Devido ao grande volume de informações produzidas na obtenção e validação dos

modelos matemáticos, os modelos matemáticos gerados e a análise da variância do Polímero Aniônico e Não Iônico estão apresentadas no apêndice A.

Após a validação estatística dos modelos matemáticos por meio da análise de variância (ANOVA), os gráficos de superfície de resposta para cada índice pesquisado foram gerados. Os parâmetros significativos ($p \leq 0,10$) foram obtidos nas Equações 7 e 8, que representam o modelo quadrático da Turbidez do Filtrado (uT) e o Tempo de Desaguamento (s) em função das variáveis estudadas para o desaguamento de resíduo com Polímero Catiônico e o GT1.

$$\text{Turbidez (uT)} = 82,84 - 413,32 x_2 + 416,84 x_2^2 - 332,87 x_1 x_2 \quad \text{Equação 7}$$

$$\text{Tempo de Desaguamento (s)} = 978,60 + 347 x_1 - 492,60 x_1^2 - 205,50 x_2 - 292,50 x_1 x_2 \quad \text{Equação 8}$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabelas 25.

Tabela 25: Análise da variância (ANOVA) da Turbidez do Filtrado e Tempo de Desaguamento com GT1 e Polímero Catiônico

Turbidez do Filtrado (uT)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	1942093,5	3	647364,5	11,8	0,00393*
Resíduos	382598,4	7	54656,9		
Total	2324691,9	10			
* $p \leq 0,10$; % variação explicada (R^2) = 83,5% $F_{0,10;4;6} = 3,07$					
Tempo de Desaguamento (s)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	1979846,2	4	494961,6	36,2	0,00024*
Resíduos	82030,7	6	13671,8		
Total	2061876,9	10			
* $p \leq 0,10$; % variação explicada (R^2) = 96,02 $F_{0,10;4;6} = 3,18$					

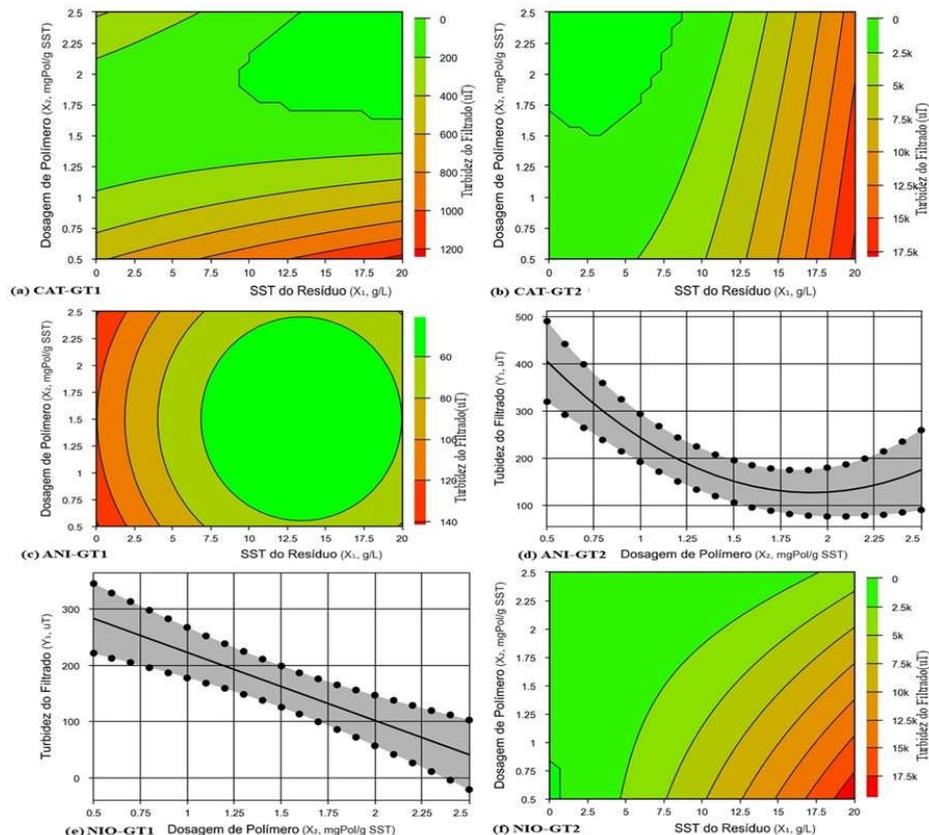
Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 25 mostra os resultados da análise da variância da Turbidez do Filtrado e Tempo de Desaguamento. Observa-se que o $F_{\text{calculado}}$ para a regressão foi altamente significativo ($p=0,0100$), sendo 3,8 vezes maior que o F_{tabelado} para turbidez do filtrado e 11,3 para tempo de desaguamento, e o percentual de variação explicada pelo modelo foi adequado ($R^2 \approx 83,5\%$ para turbidez e 96,02% para tempo de desaguamento).

Considerando a variabilidade inerente do resíduo, pode-se concluir que o modelo se ajustou bem aos dados experimentais, sendo possível construir a superfície de resposta, conforme Figuras 43, 44 e 45.

Por meio da superfície de resposta obtida para Turbidez do Filtrado em função do SST do resíduo e dosagem de polímero catiônico, a Figura 43 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 SST inicial 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 43 A (CAT-GT1) picos de turbidez do filtrado (174 uT a 1.618 uT) condicionados com os ensaios realizados com resíduo com SST de 0,25 g/L (Ensaio 1, 3 e 5) e dosagem não adequada de polímero (Ensaio 2 e 7).

Figura 43: Superfície de resposta 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



Fonte: Autor, 2019.

Para os resultados da Figura 43 B (CAT-GT2), a superfície de resposta indica uma tendência de remoção de turbidez com a combinação de polímero catiônico acima 1,50 mgPol/gSST e resíduo com SST abaixo de 8,50 g/L, obtendo turbidez mínima do filtrado de 104 a 556 uT para os Ensaios 1, 3 e 5. Observa-se que, nos Ensaios 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 μ 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 μ m e à dosagem adequada de polímero.

A Figura 43 C (ANI-GT1) mostra 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 SST inicial de 10 g/L, os resultados apresentados da superfície de resposta (Figura 43 C) mostram uma região que reúne condições favoráveis para remoção de turbidez do filtrado, apresentando valores abaixo 54 uT. Já na Figura 43 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).

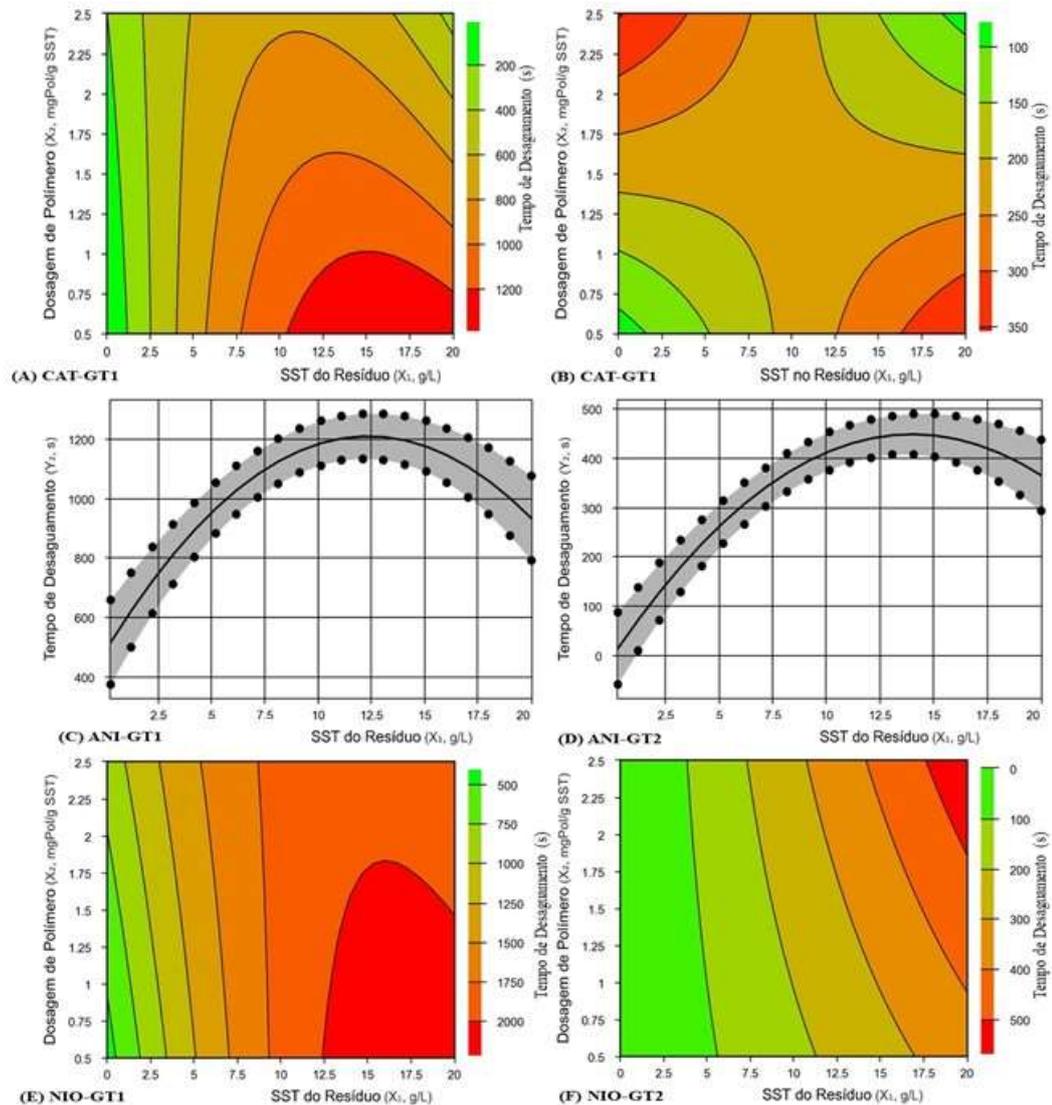
Nos ensaios realizados com o Polímero Não Iônico (ver Figura 43 E e F), os resultados encontrados para o GT1 indicaram que o aumento da dosagem de Polímero favoreceu a remoção de turbidez, porém o sistema apresentou Turbidez do Filtrado variando de 81,50 a 577. Para os ensaios realizados com o GT2, a superfície de resposta mostrou 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 superfície de resposta do Tempo de Desaguamento (s), os resultados da variação SST inicial 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 44 A). O decréscimo acentuado do tempo em relação ao SST do resíduo se justifica devido à formação do *filter cake*, que diminui a permeabilidade do tecido do geotêxtil. Observa-se, na Figura 44 A, que o Tempo de Desaguamento variou de 10 a 1.093 s, comportamento este condicionado em função do SST inicial do resíduo e Dosagem de Polímero. Já na Figura 44 B observa-se que o tempo de desaguamento foi superior comparado com os resultados da Figura 44 A. Os resultados mostram que o tamanho da abertura dos poros do GT2 (400 μm) 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.

Figura 44: Superfície de resposta do Tempo de Desaguamento: (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



Fonte: Autor, 2019.

As Figuras 44 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 superfície de resposta com o Polímero Não Iônico (ver Figura 44 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 44 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, conforme os resultados do p-valor apresentado nas Tabelas 22, 23 e 24. Apesar do Polímero Aniônico ter proporcionado 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 SST acima de 10 g/L.

5.4 ETAPA IV: ENSAIOS NA INSTALAÇÃO-PILOTO DE DESAGUAMENTO EM TUBO GEOTÊXTIL

Para uma melhor compreensão dos resultados da ETAPA IV, o item 5.4 foi subdividido em capítulos que discutem análise do desempenho de desaguamento, curva de secagem, análise dos parâmetros de retenção, análise da turbidez do filtrado, ciclos de enchimento e volume

filtrado nos ensaios da instalação-piloto em tubo geotêxtil. Sendo assim, foi realizado o delineamento composto de face centrada (DCFC) para a otimização do desaguamento na instalação-piloto do resíduo da ETA 006, considerando as seguintes variáveis: X_1 (SST inicial no resíduo) e X_2 (dosagem de polímero) e X_3 (taxa de filtração), utilizando o polímero catiônico e o geotêxtil 1 (GT1 200 μm).

5.4.1 Análise dos Parâmetros de Desempenho de Desaguamento

5.4.1.1 Teor de sólidos no interior do *bag* e porcentagem de desaguamento (PD)

A capacidade de remoção da alta umidade contida nos resíduos é um dos principais objetivos dos sistemas que utilizam a filtração em tubo geotêxtil. Para mensurar a remoção de umidade, no presente trabalho foram utilizados o percentual de desaguamento (PD) e o teor de sólidos no resíduo desaguado. O PD é um índice que mede a remoção de umidade do resíduo, enquanto que o teor de sólidos no resíduo desaguado é um parâmetro muito prático e de ampla utilização na rotina operacional de sistemas de desaguamento, pois é a partir dele que engenheiros tomam decisões sobre a melhor forma de destinação final do resíduo.

Para avaliar o desempenho do desaguamento na instalação-piloto, estão apresentados na Tabela 26 os valores codificados e reais (entre parênteses) das variáveis estudadas, bem como as respostas obtidas do teor de sólidos no interior do *bag* e a porcentagem de desaguamento (PD).

Tabela 26: Delineamento composto de faces centradas e réplicas nos pontos centrais com os ensaios em valores codificados e valores reais (entre parênteses) e respostas obtidas dos parâmetros de desaguamento na instalação-piloto (continua)

Ensaio	Variáveis			GT1	
	SST do resíduo inicial (g/L)	Dosagem de polímero (mgPol/gSST)	Taxa de filtração ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$)	Teor de sólidos no interior do <i>bag</i> (%)	PD (%)
1	-1 (0,25)	-1 (0,5)	-1(16)	30,02	99,9
2	1 (20)	-1 (0,5)	-1(16)	29,30	97,7
3	-1 (0,25)	1 (2,5)	-1(16)	35,18	99,9
4	1 (20)	1 (2,5)	-1(16)	25,70	97,2
5	-1 (0,25)	-1 (0,5)	1(101)	33,80	99,9
6	1 (20)	-1 (0,5)	1(101)	23,60	96,9
7	-1 (0,25)	1 (2,5)	1(101)	46,20	99,9
8	1 (20)	1 (2,5)	1(101)	28,3	97,4
9	-1 (0,25)	0 (1,5)	0(57)	32,70	99,9
10	1 (20)	0 (1,5)	0(57)	27,70	97,5
11	0 (10,12)	-1 (0,5)	0(57)	23,74	93,8
12	0 (10,12)	1 (2,5)	0(57)	28,30	95,1

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 26: Delineamento composto de faces centradas e tréplicas nos pontos centrais com os ensaios em valores codificados e valores reais (entre parênteses) e respostas obtidas dos parâmetros de desaguamento na instalação-piloto (continua)

Ensaio	Variáveis			GT1	
	SST do resíduo inicial (g/L)	Dosagem de polímero (mgPol/gSST)	Taxa de filtração ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$)	Teor de sólidos no interior do <i>bag</i> (%)	PD (%)
13	0 (10,12)	0 (1,5)	-1(16)	24,5	94,1
14	0 (10,12)	0 (1,5)	1(101)	25,14	94,3
15	0 (10,12)	0 (1,5)	0(57)	28,60	95,4
16	0 (10,12)	0 (1,5)	0(57)	28,70	95,2
17	0 (10,12)	0 (1,5)	0(57)	28,10	95,0

Analisando-se os resultados da Tabela 26, foi possível calcular os efeitos das variáveis estudadas, os quais estão apresentados na Tabela 27.

A Tabela 27 apresenta os coeficientes de regressão, bem como o desvio padrão e valores de *t* e *p* para as variáveis que foram estatisticamente significativas a 10% de significância. Valores de *p*-valor abaixo de 0,100 indicam que houve efeito estatístico das variáveis (X_1 , X_2 e X_3) nas respostas estudadas, com nível de confiança de 90%.

Tabela 27: Coeficiente de regressão estimados para resposta de teor de sólidos no interior do *bag* e porcentagem de desaguamento nos ensaios da instalação-piloto

Teor de sólidos no interior do <i>bag</i> (%)				
Variáveis	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	26,80	0,88	30,58	<0,0001*
SST do Resíduo inicial (X_1 L)	-4,33	0,65	-6,69	0,0003*
SST do Resíduo inicial (X_1 Q)	4,65	1,25	3,72	0,0075*
Dosagem de Polímero (X_2 L)	2,32	0,65	3,59	0,0089*
Dosagem de Polímero (X_2 Q)	0,47	1,25	0,38	0,7160
Taxa de Filtração (X_3 L)	1,23	0,65	1,91	0,0984*
Taxa de Filtração (X_3 Q)	-0,73	1,25	-0,58	0,5799
SST do Resíduo inicial x Dosagem de Polímero ($X_1 \times X_2$)	-2,06	0,72	-2,84	0,0250*
SST do Resíduo inicial x Taxa de Filtração ($X_1 \times X_3$)	-2,24	0,72	-3,09	0,0176*
Dosagem de Polímero x Taxa de Filtração ($X_2 \times X_3$)	1,94	0,72	2,68	0,0314*
PD (%)				
Variáveis	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	94,71	0,17	565,62	<0,0001*
SST do Resíduo inicial (X_1 L)	-1,29	0,14	-9,19	<0,0001*
SST do Resíduo inicial (X_1 Q)	3,92	0,22	17,94	<0,0001*

* $p \leq 0,10$; L- termos lineares; Q- termos quadráticos.

Fonte: Autor, 2019.

Por meio da Tabela 27, observa-se que os termos quadráticos da dosagem de polímero (X_2) e taxa de filtração (X_3) não foram estatisticamente significativos ($p > 0,10$) para teor de sólidos no interior do *bag*. Entretanto, os resultados foram significativos ($p < 0,10$) para termos lineares e quadráticos da variável X_1 (SST do Resíduo inicial), para os termos lineares da variável X_2 e X_3 , e para as interações entre as variáveis ($X_1 \times X_2$, $X_1 \times X_3$ e $X_2 \times X_3$), com nível de confiança de 90%. Portanto, os resultados evidenciam que o aumento do teor de sólidos no interior do *bag* foi condicionado pela ação do polímero, dosagem e taxa de filtração.

Quanto à porcentagem de desaguamento (PD), observa-se que a média e os termos lineares e quadráticos da variável X_1 apresentaram significância ($p < 0,10$), conforme apresentado na Tabela 27. Entretanto, as variáveis X_2 e X_3 e suas interações entre as variáveis ($X_1 \times X_2$, $X_1 \times X_3$ e $X_2 \times X_3$) não apresentaram nenhum efeito estatístico nos ensaios de desaguamento. Contudo, a PD foi condicionada somente pelo SST do resíduo.

Considerando-se os parâmetros significativos ($p \leq 0,10$), obtiveram-se as Equações 9 e 10, que representam o modelo quadrático do teor de Sólidos no interior do *bag* (%) e PD (g/m^2), em função das variáveis estudadas para o desaguamento de resíduos.

$$\text{Teor de sólidos no interior do Bag (\%)} = 26,73 - 4,33 x_1 + 4,52 x_1^2 + 2,32 x_2 + 1,23 x_3 - 2,06 x_1 x_2 - 2,24 x_1 x_3 + 1,94 x_2 x_3 \quad \text{Equação 9}$$

$$\text{PD (\%)} = 94,71 - 1,29 x_1 + 3,92 x_1^2 \quad \text{Equação 10}$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 28. O $F_{\text{calculado}}$ para a regressão foi altamente significativo ($p = 0,0100$), sendo 7,3 vezes maior que o F_{tabelado} para teor de sólidos no interior do *bag* e 74,4 para PD, e o percentual de variação explicada pelo modelo foi adequado ($R^2 \approx 93,50\%$ para teor de sólidos e $96,67\%$ para PD).

Tabela 28: ANOVA para resposta de teor de sólidos no interior do *bag* (%) e PD (%) nos ensaios da instalação-piloto (continua)

Teor de sólidos no interior do <i>bag</i> (%)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	445	7	63,6	18,5	0,00011*
Resíduos	30,9	9	3,4	42,5	0,02320
Total	475,9	16			

* $p \leq 0,10$; % variação explicada (R^2) = 93,50 $F_{7,9;0,10} = 2,51$

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 28: ANOVA para resposta de teor de sólidos no interior do *bag* (%) e PD (%) nos ensaios da instalação-piloto (continua)

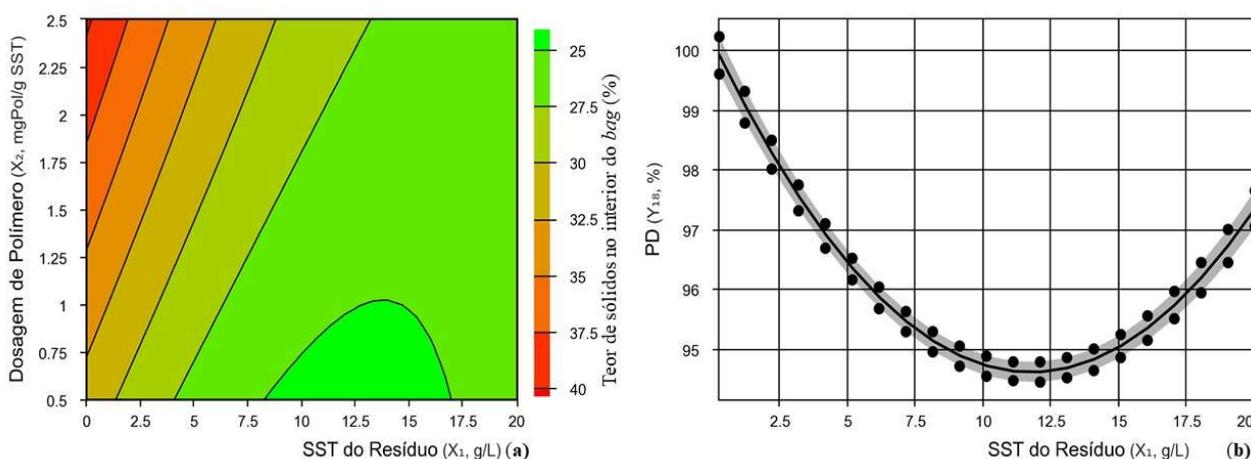
Fontes de variação	Soma dos quadrados	PD (%)			
		Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	79,7	2	39,9	203,2	0,00000*
Resíduos	2,7	14	0,2		0,15172
Total	82,5	16			

* $p \leq 0,10$; % variação explicada (R^2) = 96,67 $F_{2;14;0,10} = 2,73$

Fonte: Autor, 2019.

Considerando a variabilidade inerente do resíduo, pode-se concluir que o modelo se ajustou bem aos dados experimentais, sendo possível construir a superfície de resposta, conforme Figuras 45 e 46.

Figura 45: Superfície de resposta do teor de sólidos no interior do *bag* (a) e PD (b) em função do SST do resíduo e dosagem de polímero para os ensaios na instalação-piloto



Fonte: Autor, 2019.

Por meio da curva de contorno da Figura 45 (a), verifica-se que, em função do SST do resíduo e dosagem de polímero nos ensaios da instalação-piloto, há uma região favorável para os parâmetros de desempenho de desaguamento.

Para se obter teor de sólidos no resíduo desaguado superior a 30%, foram necessárias dosagens de polímero de 1,78 mgPol/gSST nas amostras de resíduos com SST do resíduo inicial abaixo de 8,6 g/L e taxa de 57 m³.m⁻².dia⁻¹.

A Figura 45 (b) mostra os resultados da porcentagem de desaguamento em função do SST do resíduo. Observa-se que o SST do resíduo foi a variável que promoveu a variação da PD nos ensaios da instalação-piloto.

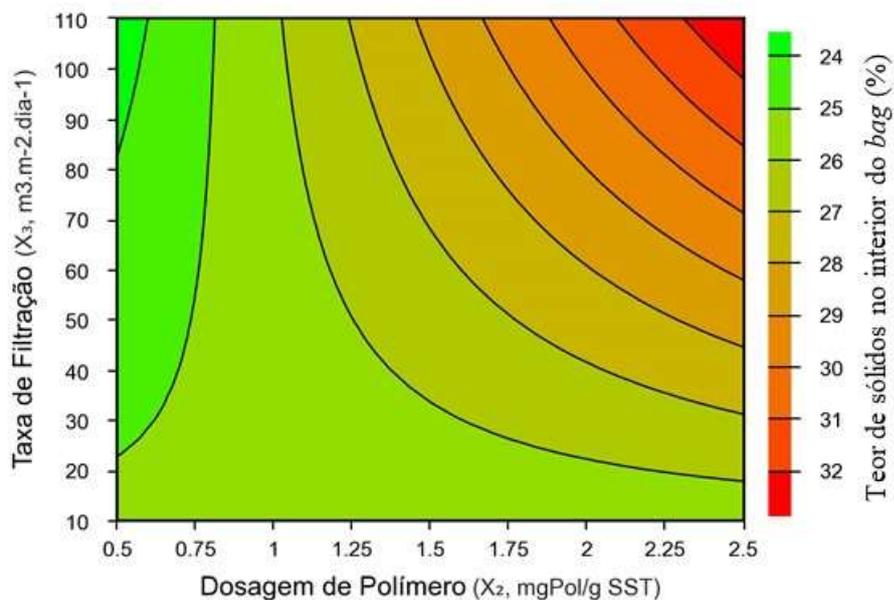
Tal efeito é explicado por Gaffney *et al.* (1999), segundo os quais a torta de resíduo, ou *filter cake*, é a camada de resíduo que se adere à interface entre o geotêxtil e o material a ser desaguado por colmatação física ou biológica, e que aumenta a retenção de partículas do sistema, por ser uma camada “autofiltrante”, contudo diminui a permeabilidade do sistema, podendo levar à diminuição da eficiência de desaguamento.

Analisando a superfície de resposta, os resultados evidenciam, para os resíduos estudados com SST do resíduo abaixo de 8,65 g/L (Figura 45 b), que o parâmetro PD resultou acima de 95%, e conseqüentemente a fração líquida foi drenada com facilidade, e o resíduo retido no interior do *bag* apresentou teor de SST acima de 30%.

Pode ser visto ainda na Tabela 26 que os ensaios realizados com SST do resíduo inicial com 0,25 g/L, apresentaram PD na instalação-piloto acima de 99,9%. Nos ensaios com o desaguamento com SST do resíduo 10,12 g/L, a PD variou de 93,8% a 95,4% (Ensaio 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17). Entretanto, foi observado que, nos ensaios com SST do resíduo inicial de 20 g/L, os resultados apresentaram um pequeno incremento na PD, variando de 96,9% a 97,7 (Ensaio 2, 4, 6, 8 e 10).

A Figura 46 mostra os resultados da curva de contorno do teor de sólidos no interior do *bag* em função da dosagem de polímero e taxa de filtração nos ensaios da instalação-piloto.

Figura 46: Superfície de resposta do teor de sólidos no interior do *bag* em função da dosagem de polímero e taxa de filtração para os ensaios na instalação-piloto



Fonte: Autor, 2019.

Ferreira e Viana (2013) também relatam que as bolsas de geotêxtil, conhecidas como *bags*, sofrem frequentes enchimentos até atingir sua capacidade máxima de armazenamento. Segundo Hernandez *et al.* (2006), o resíduo retido no interior dos *bags* pode atingir teores de sólidos na faixa de 20% a 50%, embora alguns fabricantes indiquem valores de até 70%. Por meio da Tabela 28 e Figura 46, observa-se que os resultados do teor de sólidos obtidos na instalação-piloto variaram de 23,60% a 46,20%. Tais resultados mostram a eficiência no sistema de desaguamento quando comparados com a literatura que preconiza teor de sólidos no interior do *bag* acima de 20%. Desse modo, à medida que aumenta a porcentagem de desaguamento, aumenta também o percentual de sólidos retidos no geotêxtil. Na Figura 46, os melhores resultados do teor de sólidos no interior do *bag* estão associados com o aumento da dosagem de polímero e taxa de filtração, obtendo uma região na superfície de resposta com teor de sólidos acima de 30%.

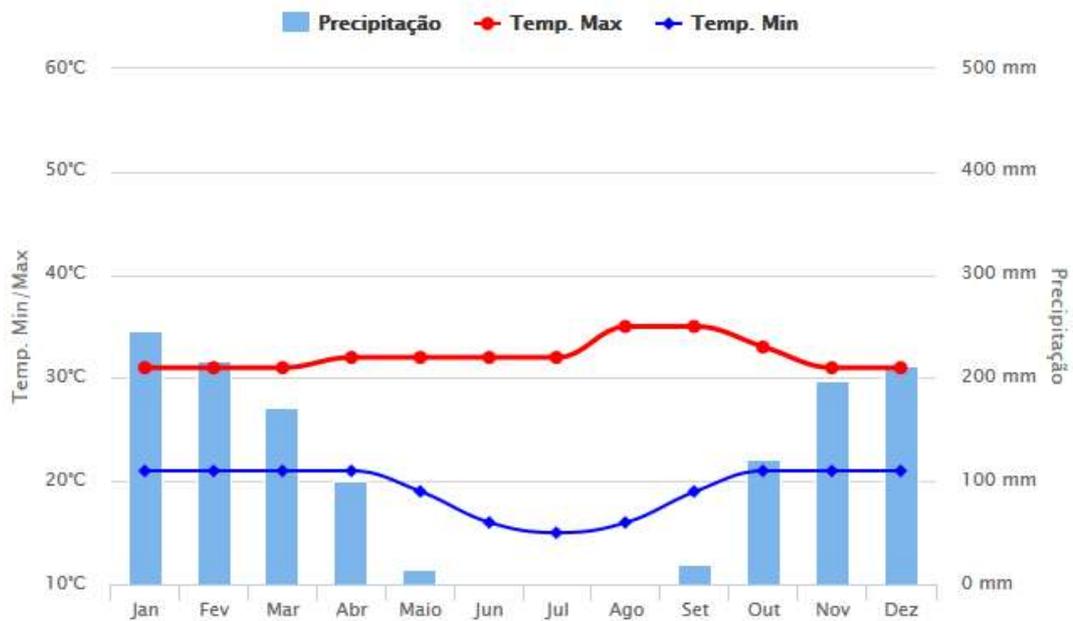
5.4.1.2 Curva de secagem

Muitas vezes o sucesso ou fracasso do desempenho desaguamento depende do tempo que o sistema leva para que determinado resíduo alcance o teor de sólidos considerado aceitável (MOO-YOUNG *et al.*, 2002). A Figura 47 apresenta a precipitação média (mm) e temperatura máxima e mínima na cidade de Palmas-TO, cujos dados foram obtidos no ANA – Agência Nacional de Águas no período em 2018.

Assim, para analisar este parâmetro, foram construídas curvas de secagem (Figura 48) onde foram plotados os valores relativos ao teor de sólidos retido no interior do *bag* em função do tempo.

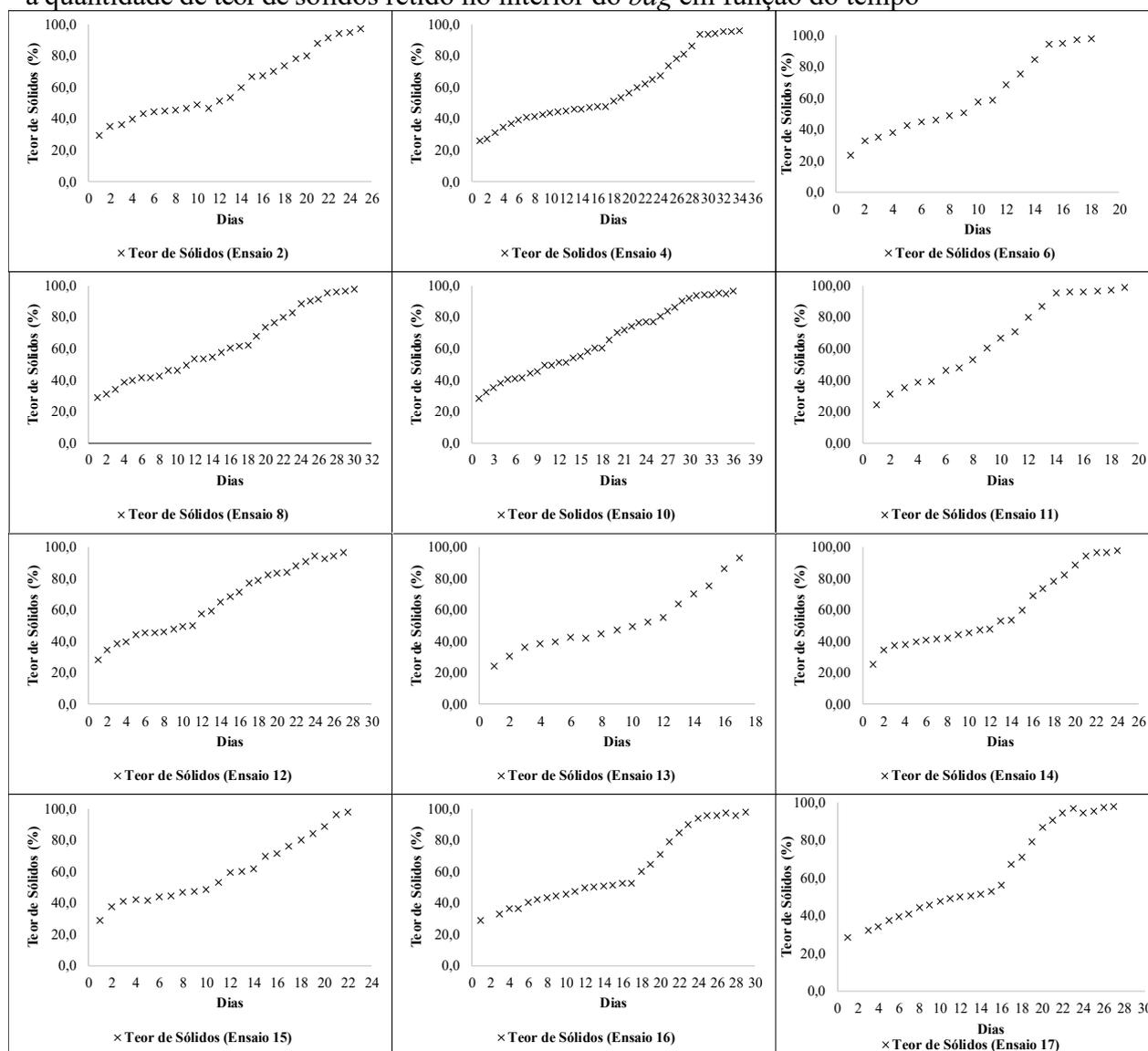
A Figura 48 mostra os resultados da curva de secagem dos Ensaios 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16 e 17. Os ensaios na instalação piloto foram realizados nos meses de Junho a Setembro de 2018. Vale ressaltar que não foi possível apresentar os resultados da curva de secagem do resíduo com SST de 0,25 g/L, por não ter volume suficiente no interior do *bag* para realizar o monitoramento.

Figura 47: Precipitação média (mm) e temperatura máxima e mínima na cidade de Palmas em 2018



Fonte: (ANA, 2018)

Figura 48: Curva de Secagem dos Ensaios 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16 e 17: valores relativos à quantidade de teor de sólidos retido no interior do *bag* em função do tempo



Fonte: Autor, 2019.

Barbosa (2001) também relata eficácia máxima do sistema de desaguamento em tubo geotêxtil quando o teor de sólidos é de 100%, ou seja, teor de umidade igual a zero. Para os ensaios realizados com resíduo com SST de 10 g/L (ver Ensaios 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17 da Figura 48), observa-se que a combinação ideal de polímero e taxa de filtração apresentaram diferentes resultados na curva de secagem, conseqüentemente atingiu-se a redução máxima de volume por saída de líquido por meio do emprego de sistema fechado de geotêxtil. Di Bernardo *et al.* (2012) destacam ainda as diferenças de comportamento durante o desaguamento entre resíduos gerados em diferentes ETA, pois há diversos fatores envolvidos na operação do sistema.

No Ensaio 11 (dosagem: 0,5 mgPol/gSST e taxa de filtração: 57 m³.m⁻².dia⁻¹), observa-se que a porcentagem inicial de sólidos encontrada foi 23,7%; após 20 dias de secagem e

monitoramento, essa porcentagem alcançou 98,5%. Já no Ensaio 12, quando aumentou a dosagem do polímero (dosagem: 2,5 mgPol/gSST e taxa de filtração: $57 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), observou-se um aumento da porcentagem inicial de sólidos para 28,3%. Com isso, o Ensaio 12 levou 28 dias para obter porcentagem de sólidos acima de 97%.

Nos Ensaio 13 e 14 (SST do resíduo inicial de 10,13 g/L e dosagem de 1,5 mgPol/gSST), o sistema de desaguamento operou com taxa de filtração variando de 16 a $101 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$; observa-se que o teor de sólido inicial foi semelhante, com valor 25%. Entretanto, o ensaio 13, que utilizou taxa de filtração menor ($16 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), no final de 17 dias de monitoramento, obteve 93% de teor de sólidos. E o ensaio 14, que utilizou taxa de filtração de $101 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, após 24 dias, obteve teor de sólidos acima de 95% no interior do *bag*.

Resultados semelhantes foram encontrados por Guimaraes *et al.* (2014), cujo trabalho avaliou o desaguamento de resíduo do decantador de uma ETA de ciclo completo, com 1,3% de teor de sólidos. Os autores apresentaram a curva de secagem para o teor de sólidos no resíduo desaguado. Os resultados ficaram constantes a partir de 10 dias após o encerramento do ensaio, até atingir o valor de 27,1% após 20 dias.

Vale ressaltar que nesse trabalho os ensaios foram realizados em bolsa de pequena dimensão (com 15 cm de altura); portanto, em escala real, esses valores devem sofrer alterações, pois a altura final de um tubo geotêxtil pode chegar a 2,0 m. A Tabela 23 e a Figura 40 mostram os resultados do teor de sólidos coletado no interior do *bag* da ETA 006 após 90 dias de secagem em escala real. Os resultados apresentados de três amostras no interior do *bag* mostram que o teor de sólidos variou de 20% a 30%.

Os Ensaio 15, 16 e 17 foram realizados em triplicata com objetivo de verificar a repetibilidade do processo no planejamento experimental. Os resultados apresentam um teor de sólidos inicial de 28% para os três ensaios com tempo de secagem variando de 24 a 29 dias.

Já nos ensaios feitos com resíduo com SST inicial de 20 g/L (ver Ensaio 2, 4, 6, 8 e 10 da Figura 48), observam-se diferentes resultados na curva de secagem com a combinação de diferentes dosagens de polímero e taxa de filtração. Nos Ensaio 2 (dosagem: 0,5 mgPol/gSST e taxa de filtração: $16 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$) e 4 (dosagem: 2,5 mgPol/gSST e taxa de filtração: $16 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), observa-se que a porcentagem inicial de sólidos encontrada foi 29,9% e 25,7%, respectivamente. Observa-se que a taxa de filtração no Ensaio 2 e no Ensaio 4 foi decisiva para obter diferentes curvas de secagem, 25 dias e 34 dias, respectivamente.

Avaliando os Ensaio 6 e 8, realizados com SST do resíduo (20 g/L) e taxa de filtração ($101 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) e variando a dosagem (0,5 e 2,5 mgPol/gSST, respectivamente), os resultados evidenciam que o polímero teve um papel fundamental no desaguamento. Por meio da Figura

48, observa-se que o Ensaio 6 levou 18 dias, e o Ensaio 8 30 dias para alcançar uma porcentagem de sólidos acima de 97%. Nessa condição, é possível realizar comparações das variáveis na instalação-piloto, sendo que os resultados obtidos apresentam limitação na extrapolação para escala real.

O Ensaio 10 que utilizou SST do resíduo inicial de 20 g/L, dosagem 1,5 mgPol/gSST e taxa de filtração 57 m³/m².dia, apresentou teor de sólidos inicial de 27,7% e um tempo máximo de 36 dias para obter uma porcentagem de sólidos acima de 96,1%.

Barbosa (2011) relata que obteve em quarenta (40) dias de monitoramento, teor de sólidos de 100% e teor de umidade igual a zero, considerando assim a eficácia do processo de desaguamento a redução máxima de volume de líquido por meio do emprego do tubo geotêxtil.

5.4.2 Análise dos Parâmetros de Desempenho de Retenção

5.4.2.1 Turbidez do filtrado, perda de partículas (PP) e eficiência de filtração (EF)

Para avaliar o desempenho de retenção do desaguamento na instalação-piloto, estão apresentados na Tabela 29 os valores codificados e reais (entre parênteses) das variáveis estudadas, bem como as respostas obtidas para turbidez do filtrado, eficiência de filtração (EF) e perda de partículas por unidade de área (PP).

Tabela 29: Delineamento composto de face centrada e tréplicas nos pontos centrais em valores codificados e valores reais (entre parênteses) dos parâmetros de desempenho de retenção na instalação-piloto (continua)

Ensaio	Variáveis			GT1		
	SST do resíduo inicial (g/L)	Dosagem de polímero (mgPol/gSST)	Taxa de filtração (m ³ .m ⁻² .dia ⁻¹)	Turbidez do filtrado (uT)	PP (g/m ²)	EF (%)
1	-1 (0,25)	-1 (0,5)	-1(16)	107,25	977,67	60,75
2	1 (20)	-1 (0,5)	-1(16)	380,92	363,94	97,55
3	-1 (0,25)	1 (2,5)	-1(16)	45,6	83,29	93,94
4	1 (20)	1 (2,5)	-1(16)	22,08	5,38	99,97
5	-1 (0,25)	-1 (0,5)	1(101)	59,96	309,02	56,76
6	1 (20)	-1 (0,5)	1(101)	129,46	38,37	99,49
7	-1 (0,25)	1 (2,5)	1(101)	34,74	378,95	60,24
8	1 (20)	1 (2,5)	1(101)	19,60	11,92	99,92
9	-1 (0,25)	0 (1,5)	0(57)	27,11	259,01	59,47
10	1 (20)	0 (1,5)	0(57)	211,83	27,79	99,84
11	0 (10,12)	-1 (0,5)	0(57)	32,02	223,06	95,95
12	0 (10,12)	1 (2,5)	0(57)	14,26	7,59	99,93

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 29: Delineamento composto de face centrada e tréplicas nos pontos centrais em valores codificados e valores reais (entre parênteses) dos parâmetros de desempenho de retenção na instalação-piloto (continua)

Ensaio	Variáveis			GT1		
	SST do resíduo inicial (g/L)	Dosagem de polímero (mgPol/gSST)	Taxa de filtração ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$)	Turbidez do filtrado (uT)	PP (g/m^2)	EF (%)
13	0 (10,12)	0 (1,5)	-1(16)	36,65	51,67	99,43
14	0 (10,12)	0 (1,5)	1(101)	7,34	3,98	99,94
15	0 (10,12)	0 (1,5)	0(57)	10,93	27,05	99,71
16	0 (10,12)	0 (1,5)	0(57)	11,36	31,14	99,70
17	0 (10,12)	0 (1,5)	0(57)	10,50	23,17	99,72

Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 30 apresenta os coeficientes de regressão, bem como o desvio padrão e valores de t e p para as variáveis que foram estatisticamente significativas a 10% de significância. Valores de p-valor abaixo de 0,100 indicam que houve efeito estatístico das variáveis (X_1 , X_2 e X_3) nas respostas estudadas, com nível de confiança de 90%.

Tabela 30: Coeficiente de regressão e desvio padrão para resposta de Turbidez do Filtrado, Eficiência de Filtração (EF) e Perda de Partículas (PP) (continua)

Turbidez do Filtrado (uT)				
Variáveis	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	20,60	21,60	0,95	0,3721
$X_{1(L)}$	49,23	15,96	3,08	0,0177*
$X_{1(Q)}$	91,3	30,84	2,96	0,0210*
$X_{2(L)}$	-57,078	15,96	-3,58	0,0090*
$X_{2(Q)}$	-4,69	30,84	-0,15	0,8834
$X_{3(L)}$	-33,88	15,96	-2,12	0,0715*
$X_{3(Q)}$	-5,83	30,84	-0,19	0,8552
$X_1 \times X_2$	-48,04	17,85	-2,69	0,0310*
$X_1 \times X_3$	-24,79	17,85	-1,39	0,2074
$X_2 \times X_3$	35,35	17,85	1,98	0,0881*

* $p \leq 0,10$; L- termos lineares; Q- termos quadráticos.

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 30: Coeficiente de regressão e desvio padrão para resposta de Turbidez do Filtrado, Eficiência de Filtração (EF) e Perda de Partículas (PP)

(continua)

EF (%)				
Variáveis	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média*	98,42	2,23	44,19	<0,0001*
X ₁ (L)	16,56	1,65	10,06	<0,0001*
X ₁ (Q)	-17,80	3,18	-5,60	0,0008*
X ₂ (L)	4,35	1,65	2,64	0,0332*
X ₂ (Q)	0,48	3,18	0,15	0,8831
X ₃ (L)	-3,53	1,65	-2,14	0,0692*
X ₃ (Q)	2,23	3,18	0,70	0,5058
X ₁ x X ₂	-4,23	1,84	-2,30	0,0552*
X ₁ x X ₃	4,95	1,84	2,69	0,0311*
X ₂ x X ₃	-3,96	1,84	-2,15	0,06829*
PP (g/m ²)				
Variáveis	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	18,39	40,88	0,45	0,6664
X ₁ (L)	-156,05	30,21	-5,17	0,0013*
X ₁ (Q)	131,56	58,37	2,25	0,0588*
X ₂ (L)	-142,49	30,21	-4,72	0,0021*
X ₂ (Q)	103,49	58,37	1,77	0,1194
X ₃ (L)	-73,97	30,21	-2,45	0,0442*
X ₃ (Q)	15,99	58,37	0,27	0,7920
X ₁ x X ₂	54,93	33,78	1,63	0,1479
X ₁ x X ₃	6,75	33,78	0,20	0,8474
X ₂ x X ₃	162,05	33,78	4,80	0,0019*

*p<0,10; L- termos lineares; Q- termos quadráticos.

Fonte: Autor, 2019.

Por meio da Tabela 30, observa-se que a média e os termos quadráticos da dosagem de polímero (X₂) e a taxa de filtração (X₃) e as interações entre as variáveis (X₁ x X₃) não foram estatisticamente significativos ($p > 0,10$) para turbidez do filtrado.

Entretanto, os resultados foram significativos ($p < 0,10$) somente para os termos lineares e quadráticos da variável X₁ (SST do resíduo), bem como para os termos lineares da variável X₂ e X₃, e para as interações entre as variáveis (X₁ x X₂, e X₂ x X₃), com um nível de confiança de 90%. Portanto, os resultados evidenciam que a remoção da turbidez nos ensaios da instalação-piloto foi condicionada pela ação do polímero, dosagem e taxa de filtração.

Para resposta eficiência de filtração (EF), observa-se que a média e os termos lineares e quadráticos da variável X₁ e os termos lineares das variáveis X₂ e X₃ e as interações entre as variáveis apresentaram significância ($p < 0,10$), conforme apresentado na Tabela 30. Entretanto, nas variáveis X₂ e X₃ os termos lineares não apresentaram nenhum efeito estatístico nos ensaios de desaguamento. Contudo, a EF foi condicionada pelas três variáveis estudadas e suas interações.

A Tabela 30 mostra o tratamento estatístico dos resultados obtidos para o índice perda de partículas (PP) nos ensaios da instalação-piloto. Os valores para este índice indicam que os termos lineares e quadráticos da variável X_1 e os termos lineares das variáveis X_2 e X_3 e as interações entre as variáveis $X_2 \times X_3$ apresentaram significância ($p < 0,10$). Não foram observados o efeito estatístico para PP para média e os termos quadráticos das variáveis X_2 e X_3 e suas interações das variáveis $X_1 \times X_2$ e $X_1 \times X_3$. Sendo assim, a PP foi influenciada pelo SST do resíduo, dosagem de polímero e taxa de filtração.

Considerando-se os parâmetros significativos ($p \leq 0,10$), obtiveram-se as Equações 11, 12 e 13, que representam o modelo quadrático da Turbidez (uT), EF (%) e PP (g/m^2), em função das variáveis estudadas para o desaguamento de resíduos.

$$\text{Turbidez (uT)} = 17,59 + 49,23 x_1 + 85,96 x_1^2 - 57,08 x_2 - 33,88 x_3 - 48,05 x_1 x_2 + 35,36 x_2 x_3$$

Equação 11

$$\text{EF (\%)} = 99,20 + 16,56 x_1 - 16,40 x_1^2 + 4,35 x_2 - 3,53 x_3 - 4,23 x_1 x_2 + 4,95 x_1 x_3 - 3,96 x_2 x_3$$

Equação 12

$$\text{PP (g/m}^2\text{)} = 21,40 - 156,05 x_1 + 137 x_1^2 - 142,49 x_2 + 108,92 x_2^2 - 73,97 x_3 + 162,05 x_2 x_3$$

Equação 13

A Tabela 31 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a resposta de turbidez (uT), EF (%) e PP (g/m^2), conforme proposto por Rodrigues e Iemma (2014). Pode ser verificada a validade do modelo matemático obtido, visto que a máxima variância explicável ($R^2 \approx 84,69\%$ para turbidez, 95,7% para EF e 91% para PP) e o teste $F_{\text{calculado}}$ para a regressão foram altamente significativos ($p=0,0100$), sendo 3,7 vezes maior que o F_{tabelado} para turbidez, 11,4 vezes superior para EF e 6,8 vezes para PP, com 90% de confiança.

Tabela 31: ANOVA para resposta de Turbidez do Filtrado, Eficiência de Filtração (EF) e Perda de Partículas (PP) (continua)

Turbidez do Filtrado (uT)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	127190,2	6	21198,3	9,22	0,00134*
Resíduos	22986,2	10	2298,6		
Total	150176,4	16			

* $p \leq 0,10$; % variação explicada (R^2) = 84,69 $F_{0,10;6;10} = 2,46$

Fonte: Autor, 2019.

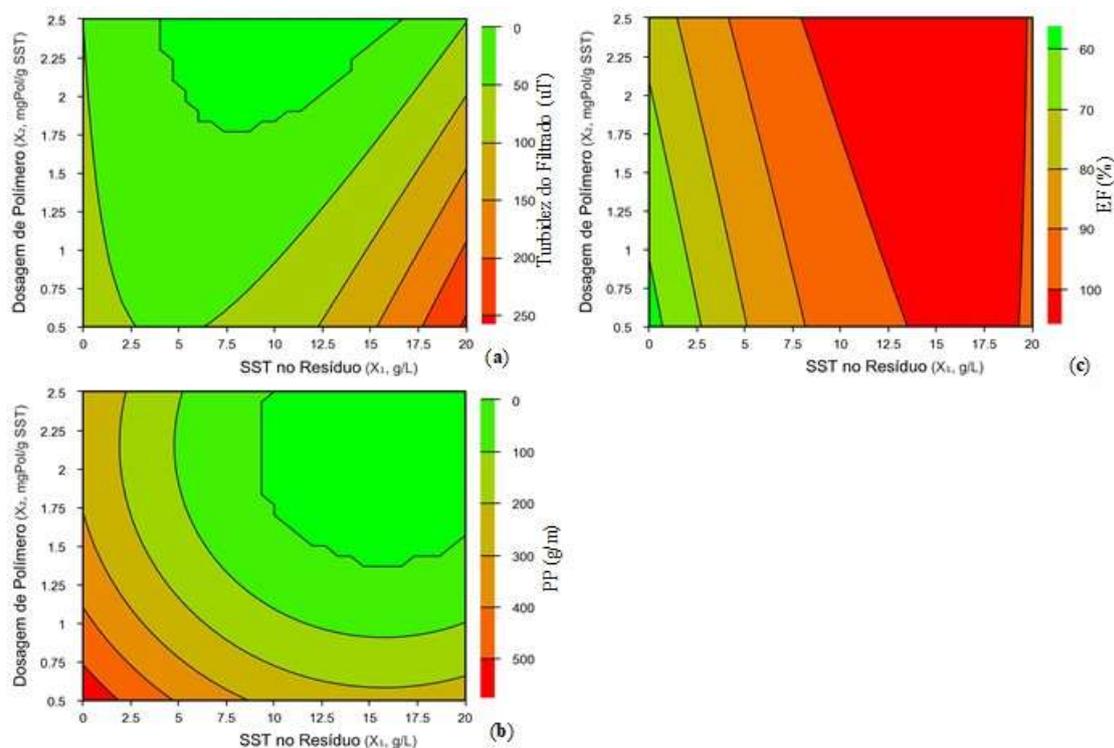
Tabela 31: ANOVA para resposta de Turbidez do Filtrado, Eficiência de Filtração (EF) e Perda de Partículas (PP) (continua)

EF (%)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	4628,9	7	661,3	28,7	0,00002*
Resíduos	207,6	9	23,1		
Total	4836,5	16			
*p≤0,10; % variação explicada (R ²) = 95,7 F _{0,10;7;9} = 2,51					
PP (g/m ²)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	900701,9	6	150117,0	16,9	0,00011*
Resíduos	89077,7	10	8907,8		
Total	989779,6	16			
*p≤0,10; % variação explicada (R ²) = 91,0 F _{0,10;6;10} = 2,46					

Fonte: Autor, 2019.

Considerando a variabilidade inerente do resíduo, pode-se concluir que o modelo se ajustou bem aos dados experimentais, sendo possível construir a superfície de resposta, conforme Figuras 49, 50 e 51.

Figura 49: Superfície de resposta da Turbidez do Filtrado (a), perda de partículas PP (b) e eficiência de filtração EF (c) em função do SST do resíduo inicial e dosagem de polímero para os ensaios na instalação-piloto



Fonte: Autor, 2019.

Por meio da Figura 49 são apresentados os resultados da superfície de resposta da Turbidez do Filtrado (a), Eficiência de Filtração EF (b) e Perda de Partículas PP (c) em função do SST no resíduo e dosagem de polímero para os ensaios na instalação-piloto.

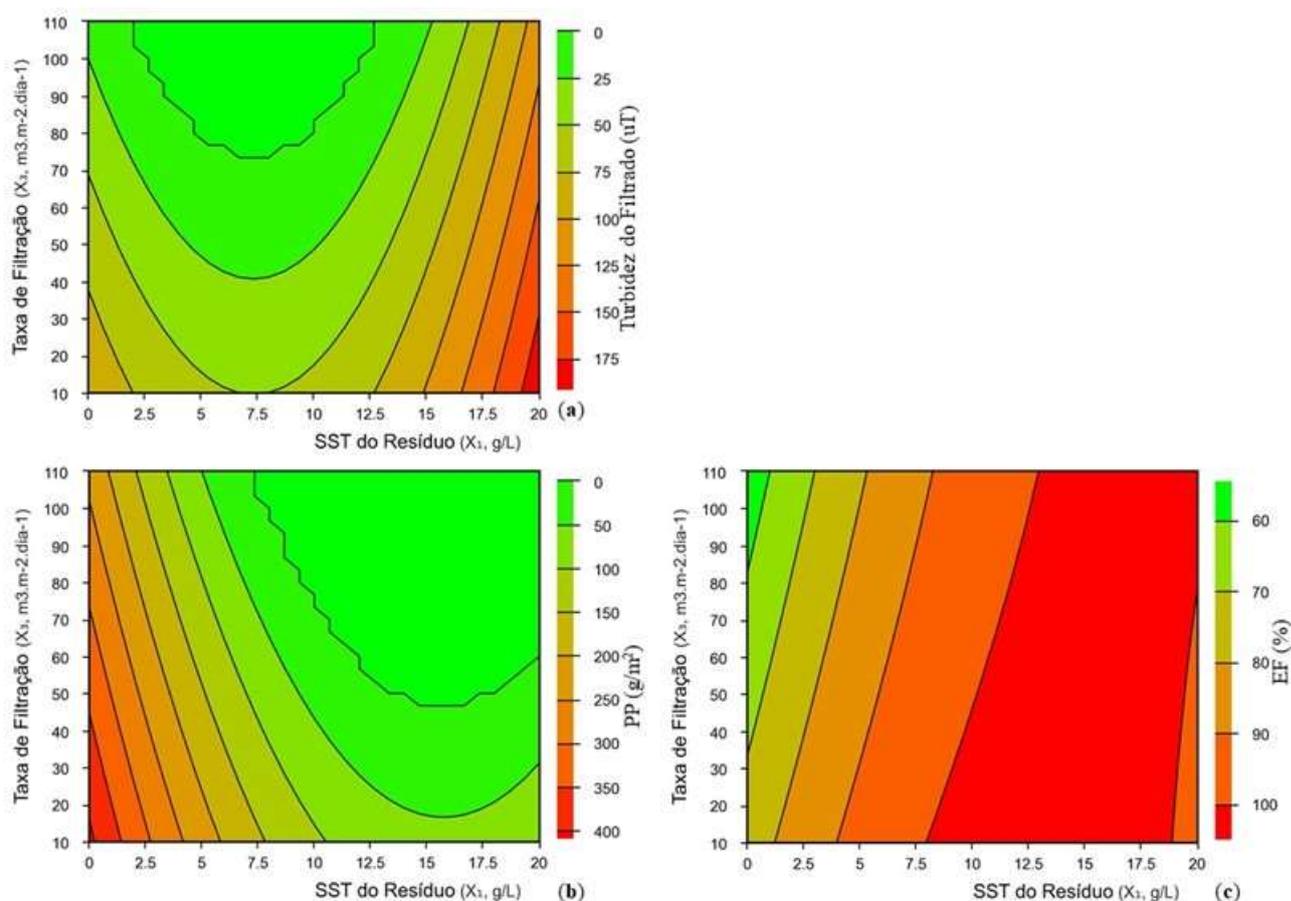
Os resultados apresentados na superfície de resposta da Figura 49 (a) mostram uma região de tendência de remoção da turbidez do filtrado associada com a combinação ideal de polímero catiônico e teor de SST no resíduo. Entretanto, foram observados picos de turbidez do filtrado nos Ensaios 1, 2, 5, 6 e 11 (ver Tabela 36), que utilizaram dosagem mínima de polímero 0,5 mgPol/gSST, obtendo valores mínimos de 120,5 uT e máximos de 535,7 uT. Os resultados da superfície de resposta evidenciam que a aplicação da dosagem de polímero maior que 1,7 mgPol/gSST associado com resíduos com SST mínimo de 4 g/L e máximo de 16 g/L foram as condições favoráveis na remoção de Turbidez no Filtrado.

Os resultados apresentados na Figura 49 (b) mostram na superfície de resposta a região de tendência na redução da PP g/m^2 . Os resultados evidenciam que, com a combinação de dosagens de polímero acima de 1,30 mgPol/gSST e resíduo com SST de 10 g/L, foram obtidos valores de PP inferiores a 27,1 g/m^2 . Tominaga (2010) destaca que perda de partículas em excesso pode se agravar, quando o geotêxtil não consegue reter as partículas do material, causando a instabilidade do sistema, pelo fluxo intenso e erosão interna contínua, provocados pelos grandes vazios no interior do material retido, formados pela perda das partículas sólidas. Este processo pode ser minimizado pelo adequado condicionamento químico do resíduo a ser desaguado. Sendo assim, foi observada uma instabilidade no sistema de desaguamento com os ensaios com teor de SST de 0,25 g/L no resíduo e a utilização de dosagem de polímero inferior a 0,5 mgPol/gSST, obtendo valores de PP variando de 309,02 a 977,67 g/m^2 . Nesses ensaios, observa-se que a dosagem do polímero influenciou diretamente na redução da PP; assim, é necessário buscar o ponto de condicionamento químico ótimo, pois a falta ou excesso de condicionamento químico pode comprometer a eficiência do sistema.

A Figura 49 (c) indica que os melhores resultados da EF foram obtidos com o aumento do SST no resíduo. Verifica-se, por meio da superfície de resposta, que o sistema obteve 80% de eficiência de filtração com os ensaios realizados com teor de SST superior a 5 g/L. Tais resultados foram superiores ao mínimo preconizado por Christopher e Holtz (1985), os quais consideram que, para aplicações em sistemas de filtração, a eficiência de filtração mínima é de 75%. Achados semelhantes foram apresentados por Myers e Elton (2011). Os autores destacam que, se a floculação é eficaz, a EF se aproxima de 100% para qualquer geotêxtil estudado. Satyamurthy e Bhatia (2009) também realizaram ensaios em filtros pressurizados com resíduo, e os resultados da EF aproximaram-se de 99,9% ao usar floculantes.

A Figura 50 mostra os resultados da superfície de resposta da Turbidez do Filtrado (a), PP (b) e EF (c) em função do SST no resíduo e taxa de filtração para os ensaios na instalação-piloto.

Figura 50: Curva de contorno para Turbidez do Filtrado (a), PP (b) e EF (c) em função do SST inicial do resíduo e taxa de filtração para os ensaios na instalação-piloto



Fonte: Autor, 2019.

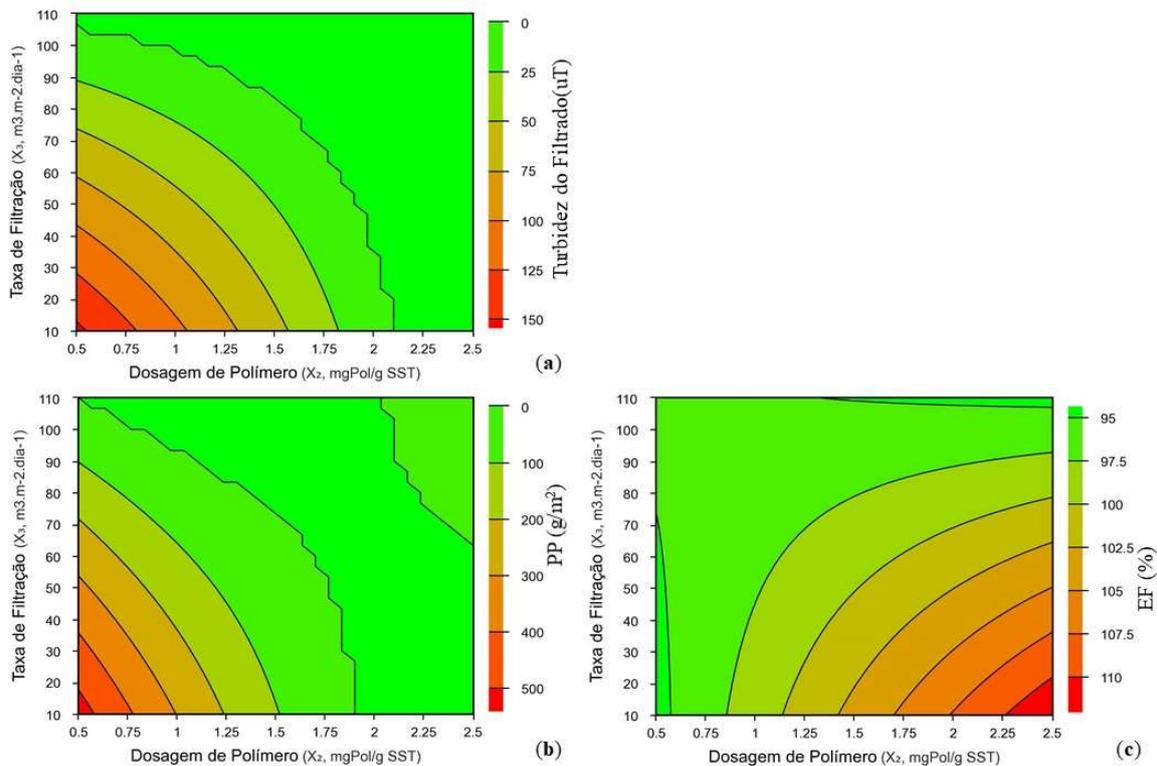
Os resultados apresentados na superfície de resposta da Figura 50 (a) mostram região de tendência de remoção da turbidez do filtrado associada com a combinação adequada da taxa de filtração e SST inicial do resíduo. Observa-se que a redução da turbidez do filtrado foi condicionada a partir de $100 m^3.m^{-2}.dia^{-1}$, contudo os melhores resultados foram visualizados na superfície de resposta com taxa acima de $150 m^3.m^{-2}.dia^{-1}$ e SST no resíduo variando de 2,80 g/L a 11,30 g/L.

Observa-se, na superfície de resposta (ver Figura 50 b), que a redução da PP foi visualizada com a combinação da taxa de filtração superior a $100 m^3.m^{-2}.dia^{-1}$ e resíduo com teor de sólidos a partir de 8,5 g/L.

Por meio da Figura 50 (c), a superfície de resposta mostra que o sistema de desaguamento apresentou EF maior que 90%, com teor de SST no resíduo inicial de 8 g/L e taxa de filtração variando de 16 a 101 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. Observa-se ainda que os ensaios com resíduo com teor de SST abaixo de 2 g/L associado com taxa de filtração superior a 75 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ apresentaram eficiência abaixo de 70%, considerado insatisfatório segundo Christopher e Holtz (1985).

A Figura 51 apresenta os resultados da curva de contorno para turbidez do filtrado (a), PP (b) e EF (c) em função da dosagem de polímero e taxa de filtração para os ensaios na instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil.

Figura 51: Curva de contorno para turbidez (a), PP (b) e EF (c) em função da dosagem de polímero e taxa de filtração para os ensaios na instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil



Fonte: Autor, 2019.

De acordo com a Figura 51 (a), observa-se, por meio da superfície de resposta para Turbidez do Filtrado em função das dosagens de polímero e taxa de filtração, que há uma região satisfatória para promover a remoção de turbidez no filtrado na faixa de combinações do polímero catiônico acima de 1,78 mgPol/gSST e taxa de filtração variando de 16 a 101 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

Nos resultados obtidos da PP (ver Figura 51 b) em função das dosagens de polímero e taxa de filtração, observa-se que a dosagem superior 1,90 mgPol/gSST associada com as taxas de filtração avaliada (16 a 101 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$) foram decisivas na retenção das partículas. Entretanto, as três taxas de filtração ensaiadas obtiveram redução da PP associada com dosagem adequada de polímero para formação do *filter cake*.

Na superfície de resposta da EF (ver Figura 51 c), os resultados indicam uma tendência de retenção com a combinação da taxa de filtração abaixo 160 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ e dosagem superior a 1,50 mgPol/gSST.

5.4.2.2 Análise da turbidez do filtrado, ciclos de enchimento e volume bombeado nos ensaios da instalação-piloto

Nos últimos anos tem crescido o interesse pela recirculação de água de lavagem de filtros com objetivo de minimizar os impactos ambientais e a demanda de água dos mananciais. Entretanto, a prática de recirculação de água de lavagem dos filtros pode constituir introdução de perigos no processo de tratamento da água e implicar risco à saúde da população consumidora, associado, principalmente, à presença de cistos e oocistos de protozoários (FREITAS *et al.* 2010; AROTA *et al.* 2001; USEPA, 2002).

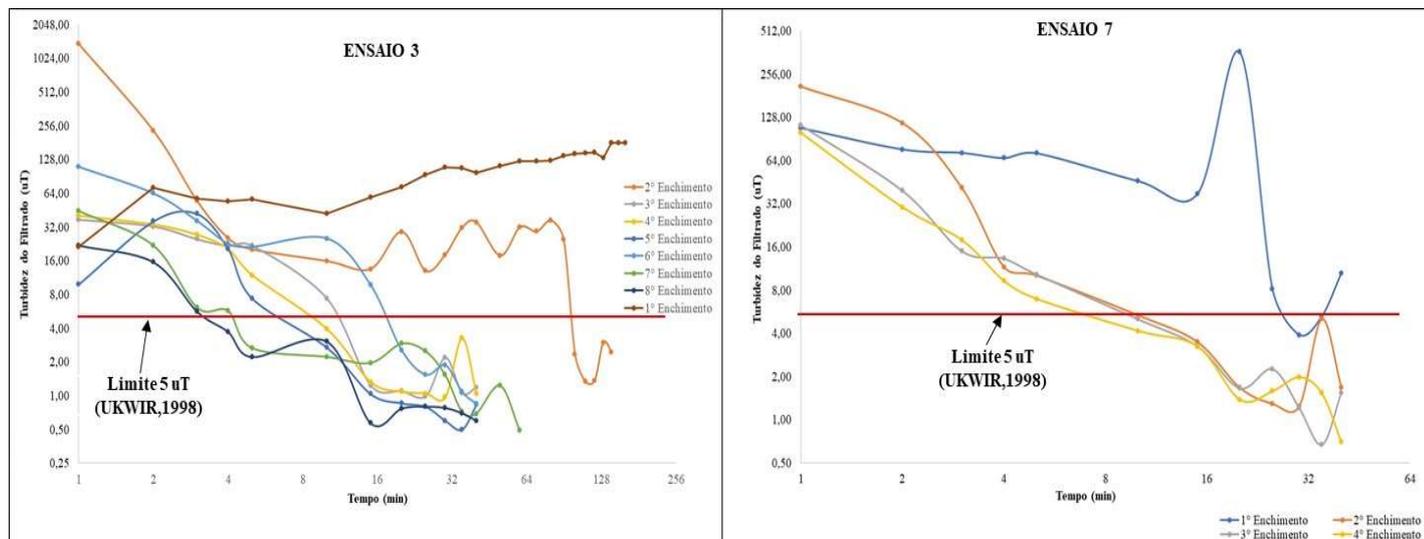
Assim, sob a ótica de avaliar uma possível recirculação, as Tabelas 32, 33 e 34 mostram os resultados da Turbidez do Filtrado, ciclos de enchimento e volume bombeado obtidos nos ensaios da instalação-piloto. As Figuras 52, 53 e 54 apresentam o comportamento da Turbidez do Filtrado dos Ensaios 3, 4, 7, 8, 14 e 16.

Tabela 32: Turbidez do Filtrado, ciclos de enchimento e volume bombeado obtidos nos ensaios da instalação-piloto com SST do resíduo inicial 0,25 g/L

Resumos do Ensaios na Instalação-piloto:								
Ensaios	SST do resíduo inicial (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol/gSST)	Taxa de Filtração ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$)	Turbidez do Filtrado (uT)			Ciclos de Enchimento	Volume Bombeado (L)
				mínimo	média	máximo		
Ensaio 1	0,25	0,5	16	3,59	107,25	362	7	2.815,80
Ensaio 3	0,25	2,5	16	0,49	45,6	1.385	8	1.538,04
Ensaio 5	0,25	0,5	101	3,33	59,96	251	5	770,12
Ensaio 7	0,25	2,5	101	0,67	34,74	365,0	4	619,0
Ensaio 9	0,25	1,5	57	0,41	27,11	162	4	708,87

Fonte: Autor, 2019.

Figura 52: Turbidez do Filtrado em função do tempo obtidos nos Ensaio 3 e 7 na instalação-piloto.



Fonte: Autor, 2019.

Os resíduos ensaiados com SST inicial de 0,25 g/L apresentaram volume filtrado superior comparados com outros ensaios do planejamento experimental. Nos Ensaio 1, 3, 5, 7 e 9 (ver Tabela 32), o sistema de desaguamento produziu volume de resíduo drenado no geotêxtil de 2.815,80 L, 1.538,04 L, 770,12 L, 619,0 L e 708,87 L, respectivamente. Observa-se que, com o aumento da dosagem de polímero 0,5 mgPol/gSST (Ensaio 1) para 2,5 mgPol/gSST (Ensaio 3), o volume do resíduo drenado foi reduzido 45,3% com 7 e 8 ciclos de enchimento, respectivamente. Com isso, a turbidez do filtrado no sistema reduziu de 107,2 (Ensaio 1) para 45,6 uT (Ensaio 3).

Os Ensaio 5 e 7 apresentaram o mesmo comportamento dos Ensaio 1 e 3, sendo que a dosagem de polímero impactou no volume de resíduo drenado no geotêxtil de 770,12 L (Ensaio 5) para 619 L (Ensaio 7). Já no Ensaio 9 (ver Tabela 32), o volume de resíduo drenado no geotêxtil na instalação-piloto foi 708,87 L, com dosagem de 1,5 mgPol/gSST e taxa de filtração de 100 m³/m².dia.

Em sistemas de tratamento de resíduos, a água filtrada das unidades de desaguamento geralmente é descartada em corpos hídricos, ou é recirculada ao início do tratamento da ETA. No Brasil, não há normas técnicas ou legislação específica para o tratamento e a recirculação de água de lavagem de filtros. O Conama 357 (2005) estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes com limite 100 uT para água de Classe 2. Nos Estados da Califórnia e de Ohio, recomenda-se que a vazão de recirculação seja inferior a 10% da vazão da estação de tratamento de água (ETA), e no Estado de Maryland, inferior a 5% após clarificação com

aplicação de polímeros. No Estado da Califórnia, recomenda-se, ainda, meta de 2 uT para a qualidade da ALF a ser recirculada ou remoção mínima de sólidos de 80% (USEPA, 2002; FREITAS *et al.* 2010). E por fim, utilizou-se como referência nesse trabalho a recomendação para recirculação da água de lavagem dos filtros no Reino Unido de 5 uT (UKWIR, 1998).

Com isso, o Ensaio 3 (ver Figura 52 a) foi operado com 8 ciclos de enchimento, sendo que no 1º ciclo de enchimento o sistema bombeou 800 L de resíduo para o interior do *bag* e a média da Turbidez do Filtrado foi de 121,7 uT (ver Figura 52 a). No 2º ciclo de enchimento, observa-se a formação do *filter cake* a partir de 100 min de operação com turbidez média do filtrado de 2 uT. No 3º ciclo de enchimento, o sistema apresentou turbidez média do filtrado de 1,29 uT com 15 min de operação na instalação-piloto. Observa-se que, a partir do 4º, 5º, 6º, 7º e 8º ciclo de enchimento, o tempo de formação do *filter cake* foi diminuindo e o sistema produziu turbidez abaixo de 5 uT.

No Ensaio 7 (ver Figura 52 b), no 1º e 2º ciclo de enchimento, os resultados da Turbidez média do Filtrado foram 106 e 141 uT, respectivamente. Observa-se que o 2º, 3º e 4º ciclo de enchimento, no tempo de 10 min de desaguamento, apresentaram Turbidez do Filtrado abaixo 5 uT.

Essa diferença dos resultados pode ser explicada com a formação do *filter cake*. Ou seja, o tempo de formação do *filter cake* no Ensaio 3 foi maior comparado com o Ensaio 7. Nessa condição, o aumento da Taxa de Filtração de 35 para 101 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ promoveu uma redução da turbidez do filtrado e, conseqüentemente, o número de ciclos de enchimento e o volume de resíduo drenado no geotêxtil foi reduzido em 59,7% no Ensaio 7.

Avaliando as diferentes condições operacionais dos Ensaios 1, 3, 5, 7 e 9 com teor de SST de 0,25 g/L do resíduo, observa-se que, nas três taxas de filtração estudada (16, 57 e 101 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), os melhores resultados obtidos foram visualizadas com taxa de filtração superior a 100 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, ou seja, à medida que a taxa de filtração aumenta nos ensaios, percebe-se um decréscimo no volume de resíduo drenado no geotêxtil e redução da turbidez do filtrado. Nessa condição, a taxa de filtração leva as partículas a obstruir as aberturas do geotêxtil mais rápido, o que ocasiona redução de permeabilidade, dificultando a saída do efluente, até a formação de *filter cake*, que é definido como uma massa de material retida no interior do geotêxtil, e como consequência reduz o volume e melhora a qualidade do efluente filtrado.

Por meio da Tabela 33, observa-se que, no resíduo estudado com SST do resíduo inicial de 20 g/L, o sistema produziu volume drenado no geotêxtil menor comparado com resíduos ensaiados com SST do resíduo inicial de 0,25 g/L e 10,3 g/L (ver Tabela 32 e 34). Observa-se que, com o aumento da dosagem de polímero 0,5 mgPol/gSST (Ensaios 2 e 4) para 2,5

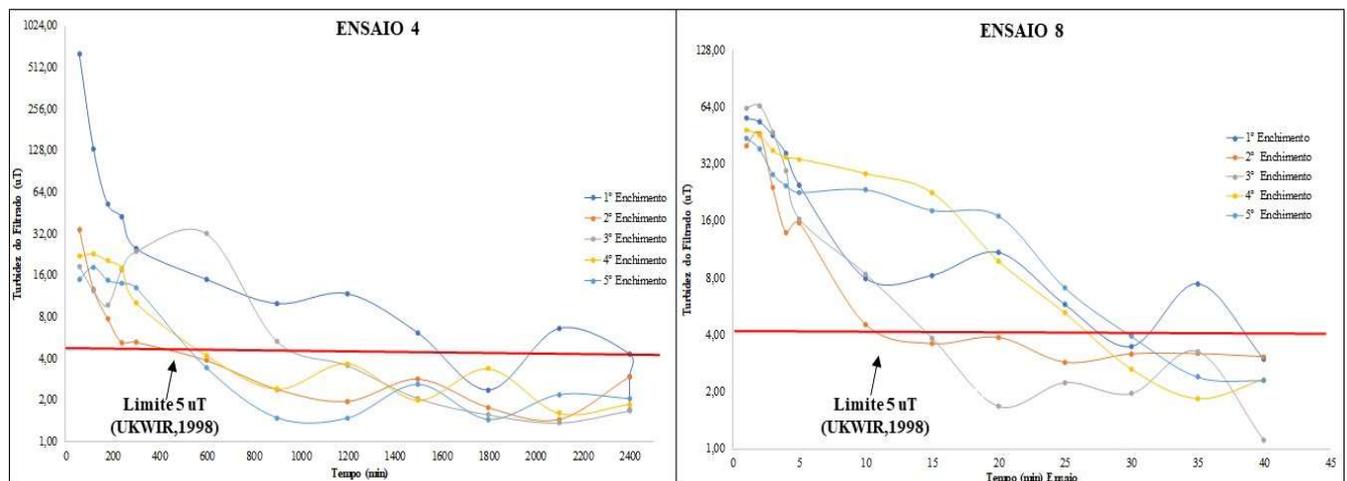
mgPol/gSST (Ensaio 6 e 8), o volume do resíduo drenado e a turbidez do filtrado foram reduzidos na instalação-piloto. Com isso, a Turbidez do Filtrado reduziu 380,92 (Ensaio 2) para 22,08 uT (Ensaio 4). Já no Ensaio 10 (ver Tabela 33), o volume de resíduo drenado no geotêxtil na instalação-piloto foi 242,7 L e a Turbidez do Filtrado variou de 1,03 uT a 1.847,50 uT. Verifica-se ainda que, nos Ensaio 6 e 8, a mudança da taxa de filtração de 16 para 101 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$ favoreceu de forma positiva a redução da turbidez do filtrado.

Tabela 33: Turbidez do Filtrado, ciclos de enchimento e volume bombeado obtidos nos ensaios da instalação-piloto com SST do resíduo inicial 20 g/L

Resumos do Ensaio na Instalação-piloto								
Ensaio	SST do Resíduo inicial (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol/gSST)	Taxa de Filtração ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$)	Turbidez do Filtrado (uT)			Ciclos de Enchimento	Volume Bombeado (L)
				mínimo	média	máximo		
Ensaio 2	20	0,5	16	1,55	380,92	4.020	6	208,72
Ensaio 4	20	2,5	16	1,37	22,08	641,0	5	252,0
Ensaio 6	20	0,5	101	1,36	129,46	1.980,0	3	106,20
Ensaio 8	20	2,5	101	1,11	19,6	64,80	4	216,10
Ensaio 10	20	1,5	57	1,03	32,02	1.847,50	7	242,7

Fonte: Autor, 2019.

Figura 53: Turbidez do Filtrado em função do tempo obtidos nos Ensaio 4 e 8 na instalação-piloto.



Fonte: Autor, 2019.

Por meio da Figura 53 (a), observa-se que, no 1º ciclo de enchimento do Ensaio 4, o sistema levou 30 min de desaguamento para obter Turbidez do Filtrado abaixo de 5 uT, enquanto que no Ensaio 2 o sistema em 5 min de desaguamento apresentou Turbidez média do Filtrado de 3,07 uT. Devido às condições operacionais dos experimentos, os Ensaio 3, 4 e 5 apresentaram

um intervalo de 24 h de descanso em relação ao Ensaio 2. Com isso, observou-se um incremento de 5 min do tempo de desaguento para atingir a meta 5 uT.

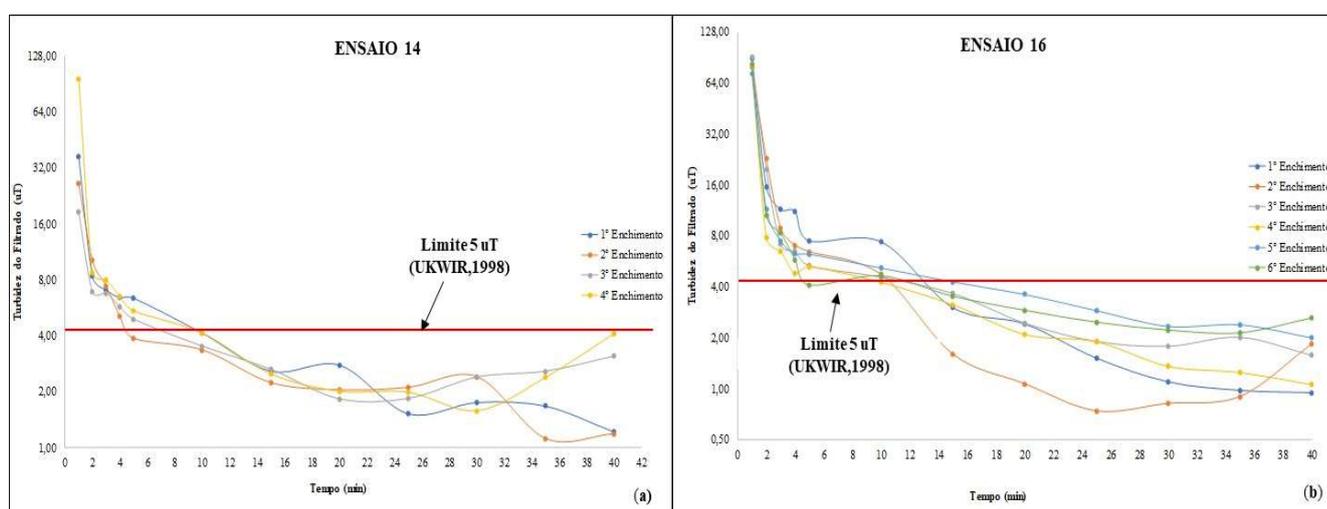
No Ensaio 8 (ver Figura 53 b), o sistema apresentou 5 ciclos de enchimentos, sendo que no 1º enchimento foi observado turbidez do filtrado inferior a 5 uT no tempo de 25 min; no 2º e 3º ciclo de enchimento, foi observado tempo de 10 e 15 min, respectivamente; e no 4º e 5º ciclo de enchimento, só foi observado Turbidez do Filtrado abaixo de 5 uT no tempo de 25 min.

Tabela 34: Turbidez do Filtrado, ciclos de enchimento e volume bombeado obtidos nos ensaios da instalação-piloto com SST do resíduo inicial 10,12 g/L

Resumos do Ensaio na Instalação-piloto								
Ensaio	SST do Resíduo inicial (g/L)	Dosagem de Polímero (mgPol/gSST)	Taxa de Filtração ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$)	Turbidez do Filtrado (uT)			Ciclos de Enchimento	Volume Bombeado (L)
				mínimo	média	máximo		
Ensaio 11	10,12	0,5	57	1,37	211,83	2.390,0	4	152,7
Ensaio 12	10,12	2,5	57	1,87	14,26	60,70	5	290,5
Ensaio 13	10,12	1,5	16	1,31	36,65	447	4	249,40
Ensaio 14	10,12	1,5	101	1,12	7,34	96,40	4	200,60
Ensaio 15	10,12	1,5	57	1,14	10,93	97,55	8	367,20
Ensaio 16	10,12	1,5	57	0,74	11,36	90,90	6	260,50
Ensaio 17	10,12	1,5	57	0,40	10,50	106,0	6	227,70

Fonte: Autor, 2019.

Figura 54: Turbidez do Filtrado em função do tempo obtidos nos Ensaio 14 e 16 na instalação-piloto.



Fonte: Autor, 2019.

Por meio da Figura 54, observa-se que, em relação ao resíduo estudado com teor de SST de 10,13 g/L, o sistema produziu volume drenado no geotêxtil nos Ensaio 11, 12, 13, 14, 15 e 16 (ver Figura 54 e Tabela 34) de 152,7 L, 290,5 L, 249,40 L, 200,60 L, 367,20 L, 260,5 L e 227,70 L, respectivamente.

Observa-se que nos Ensaio 11 e 12 (ver Tabela 34) o aumento da dosagem de polímero promoveu a redução da Turbidez do Filtrado e o volume drenado no geotêxtil.

Nos Ensaio 13 e 14, os resultados evidenciam que o aumento da taxa de filtração $16 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ para $101 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ promoveu redução da Turbidez média do Filtrado $36,6 \text{ uT}$ (Ensaio 13) para $7,34 \text{ uT}$ (Ensaio 14).

Para os Ensaio 15, 16 e 17, que operaram nas mesmas condições de dosagem, taxa de filtração e SST do resíduo, o sistema de desaguamento produziu volume drenado no geotêxtil variando de $227,70 \text{ L}$ a $367,20 \text{ L}$.

Por meio da Figura 54 (a), o volume drenado no geotêxtil foi de $200,6 \text{ L}$ para 4 ciclos de enchimento, obtendo Turbidez do Filtrado de $1,12$ a $96,40 \text{ uT}$. Observa-se que o aumento da Taxa de Filtração de 115 para $101 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ não foi relevante na redução da Turbidez do Filtrado comparado com os Ensaio 3 e 4. A Taxa de Filtração de $115 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ utilizada no Ensaio 16 obteve volume drenado no geotêxtil de $260,5 \text{ L}$ de resíduo com 6 ciclos de enchimento e turbidez mínima de $0,74$ e máxima de $90,90 \text{ uT}$. Nessa condição, o Ensaio 16 apresentou turbidez do filtrado abaixo de 5 uT a partir de 10 min de desaguamento, conforme Figura 54 (b).

De acordo com Freitas *et al.* (2010), a recirculação pode representar cerca de 5% , ou mais, do volume total de água tratada, gerando grandes volumes de resíduos em curtos espaços de tempo. Considerando os riscos biológicos na recirculação e a falta de legislação específica no Brasil, a água drenada das unidades de desaguamento poderá ser descartada em corpos hídricos ou recirculada ao início do tratamento da ETA.

Os resultados do Planejamento experimental evidenciaram que a Turbidez média do Filtrado obtida nos Ensaio 1, 2, 6 e 11 apresentou valores acima do limite preconizado pelo Conama 357/2006 de 100 uT para águas de Classe 2.

Entretanto, avaliando os Ensaio 3, 4, 7, 8, 14 e 16 (Figura 52, 53 e 54), pode-se observar que, nos primeiros minutos de desaguamento (5 a 10 min), houve picos de Turbidez do Filtrado, condicionados pela não formação do *filter cake*. Contudo, se fossem descartados os primeiros minutos de desaguamento, certamente as médias da turbidez do filtrado atenderia à meta do Reino Unido de 5 uT (UKWIR, 1998). Assim, sob a ótica da turbidez do filtrado menor que 5 uT , em sistema de escala real, esses picos de turbidez visualizados nos primeiros minutos na instalação-piloto certamente seriam minimizados pelo grande volume drenado num intervalo de 24 .

6 CONCLUSÕES

Em relação aos ensaios de bancada em geotêxtil:

- Pode-se concluir que o 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 SST no resíduo e dosagem de condicionante químico foram eficazes, uma vez que os resultados foram estatisticamente significativos;
- 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 bom desempenho 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.

Em relação aos ensaios da instalação-piloto de desaguamento em tubo geotêxtil:

- Os resultados da superfície de resposta evidenciam que aplicação da dosagem de polímero maior que 1,7 mgPol/gSST associado com resíduo com SST mínimo de 4 g/L e máximo de 16 g/L foi a condição favorável na redução da turbidez do filtrado.
- A redução da perda de partículas inferiores a 27,1 g/m^2 nos ensaios da instalação-piloto foi obtida com aplicação de dosagens de polímero acima de 1,30 mgPol/gSST e resíduo com SST inicial de 10 g/L. Entretanto, foi observada uma instabilidade no sistema de desaguamento com os ensaios com teor de SST de 0,25 g/L no resíduo e a utilização de dosagem de polímero inferior a 0,5 mgPol/gSST, obtendo valores de PP variando de 309,0 a 977,6 g/m^2 .
- Os melhores resultados da EF (%) foram obtidos com SST inicial do resíduo acima de 10 g/L associado com dosagem de polímero na faixa de 1,5 a 2,5 mgPol/gSST.

- Resíduos com SST de 0,25 g/L apresentaram os maiores valores de PP (g/m²) e baixa EF (%) no desempenho de retenção, comparados com os resíduos com SST acima de 10 g/L. Os parâmetros de Turbidez do Filtrado apresentaram valores acima de 90 uT. Tal efeito é justificado pela não formação do *filter cake*.
- A curva de contorno obtida da Turbidez do Filtrado, a PP (%) e a EF (%) em função do SST no resíduo e taxa de filtração para os ensaios na instalação-piloto evidenciaram que, dos três níveis avaliados para taxa de filtração, os melhores resultados foram observados com taxa acima de 100 m³.m⁻².dia⁻¹.
- Na amostra composta da instalação-piloto, não foi obtido turbidez do filtrado menor que 5uT para recirculação. Contudo, se fossem desprezados os primeiros minutos de desaguamento (5 a 10 min) até a formação do *filter cake*, essa meta de 5 uT seria alcançada. Em sistema em escala real, esses picos de turbidez visualizados nos primeiros minutos na instalação-piloto, certamente seriam minimizados pelo grande volume drenado num intervalo de 24 h.
- Observa-se que 75% dos ensaios da instalação-piloto apresentaram qualidade compatível para disposição em mananciais, conforme valores limites preconizados pelo Conama 357/2006 de 100 uT para águas de Classe 2.
- Na superfície de resposta, foi observada a obtenção de 30% do teor de sólidos no interior do *bag*, com a combinação de polímero de 1,78 mgPol/gSST, SST acima de 8,6 g/L e taxa de aplicação inicial de 57 m³.m⁻².dia⁻¹.
- A combinação ideal de polímero e a taxa de filtração no desaguamento da instalação-piloto apresentaram diferentes resultados na curva de secagem. Entretanto, devido à limitação da escala-piloto (bolsa de pequena dimensão com 15 cm de altura), os resultados obtidos e aplicados em escala real deverão sofrer alterações, pois a altura final de um tubo geotêxtil pode chegar a 2,0 m.
- No monitoramento da curva de secagem, foi observada a redução do volume do resíduo e o aumento gradual de sólidos retidos no interior do *bag*, possibilitando assim a finalização do desaguamento do resíduo com tempo variando de 18 a 36 dias.
- Com aumento da taxa de filtração nos ensaios, notou-se um decréscimo do volume acumulado do filtrado. Nessa condição, a taxa de filtração leva as partículas a obstruir as aberturas do geotêxtil, o que ocasiona redução de permeabilidade, dificultando a saída do efluente, até a formação de *filter cake*. Com isso, o sistema promoveu a redução da Turbidez do Filtrado nos ensaios da instalação-piloto.

- Os Ensaio realizados com resíduo inicial de SST de 0,25 g/L na instalação-piloto evidenciaram os piores resultados obtidos no desempenho de desaguamento e de retenção. Sendo assim, resíduos com baixo teor de sólidos (~0,025%) não devem ser encaminhados diretamente aos *bags*. Com isso deverão ser implantadas unidades de clarificação/adensamento, eventualmente após receber a aplicação de um floculante auxiliar; somente o resíduo resultante desse processo deverá ser encaminhado ao sistema de tubos geotêxteis, a fim de se elevar os valores de SST para no mínimo 10 g/L.

7 TRABALHOS FUTUROS

- Embora este trabalho apresente resultados estatisticamente significativos e aplicáveis nas operações de ETA, estudos em escala real devem ser feitos para validação do comportamento das variáveis aqui apresentadas. A definição dos níveis de dosagem de condicionante químico e utilização de geotêxtil dependem também de outros fatores específicos de cada ETA. Assim, o responsável operacional de ETA deve analisar os seus impactos na operação do sistema.
- Avaliar as restrições para a recirculação da água drenada nos tubos geotêxteis no processo de tratamento da água. Verificar a qualidade do efluente após o desaguamento com valores preconizados de 5 uT (UKWIR, 1998).
- Realizar ensaios de otimização obtidos no Planejamento Experimental da Instalação-Piloto em tubo geotêxtil com dimensão média (por exemplo, 5m × 5m). Nessa oportunidade, será possível avaliar os tempos máximo e mínimo de secagem (curva de secagem) em função de sólidos no resíduo a ser desaguado, possibilitando simulações do desaguamento próximas da escala real.
- Avaliar as pressões internas do tubo geotêxtil durante o bombeamento e o desaguamento.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION -APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22th edition 2012., Washington, USA.
- ACHON, C. L., BARROSO, M. M., CORDEIRO, J. S. *Leito de Drenagem : Sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água*. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 13, jan/mar 2008.
- 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 9863. *Geossintéticos – Determinação da espessura a pressões especificadas*. Parte 1 – Camada única. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181. *Análise Granulométrica*, 1984.
- 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 p
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS- ASCE; American Water Works Association- AWWA. (1996). *Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residual*. New York. 294 p.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION- AWWA. (1999). *Water Quality & Treatment - Handbook of Community Water Supplies..* American Water Works Association, 5th ED., USA.
- ANDREOLI, C.V. (2001). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Projeto PROSAB 2. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 282 p.
- AVANCINI, L.L.S. *Análise do desaguamento do lodo de estações de tratamento de água em sistemas de confinamento em geotêxtil*. 2017. 135 f. Dissertação de mestrado – Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Área de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, São Paulo, 2017.
- BARBOSA, J. A. (2011). *Análise laboratorial da eficiência de sistemas fechados de geotêxteis no desaguamento de lama de rocha fosfática*. Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 115 p.

BARROSO, M. M. 2007. 249 f. *Influência das micro e macropropriedades dos lodos de Estações de Tratamento de Águas nos desaguamentos por leito de drenagem*. Tese Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos - USP. São Carlos, São Paulo, 2007.

BHATIA, S.K.; MAURER, B.W.; KHACHAN, M.M.K.; GRZELAK, M.D.; PULLEN, T.S. (2013). *Performance Indices for Unidirectional Flow Conditions Considering Woven Geotextiles and Sediment Slurries*. Sound Geotechnical Research to Practice. 319-333. doi: 10.1061/9780784412770.021

BOURGÈS-GASTAUD, S. *et al.* Nonwoven geotextiles to filter clayey sludge: An experimental study. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 42, p. 214–223, 2014.

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. Educação Ambiental: *Lei nº 9.795 de 27 de Abril de 1999* – Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Brasília, DF, 1999.

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. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. *Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Brasília, DF, 2011

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.

BRK Ambiental / Saneatins. *Relatório Técnico de Operação da ETA 006 Palmas* – TO, 2018.

CARNEIRO, J. R. C. 2009. 602 f. *Durabilidade de Materiais Geossintéticos em Estruturas de Carácter Ambiental - A Importância da Incorporação de Aditivos Químicos*. Portugal. Tese de Doutorado. Universidade do Porto, Portugal, 2009.

CARROL, R. G. (1983). *Geotextile filter criteria. Transportation Research Record*. Engineering Fabrics in Transportation Construction, D. C. 53 pp.

CASTRO, N. P. B., Martins, P.M., Stephens, T. and Melo, L. C. Q. C. Tests to evaluate dewatering and filtration efficiency for geotextile tubes design. In: *GEOSYNTHETICS*, 2009, Salt Lake City. Proceedings... Roseville, MN: [s.n.], 2009

CASTRO, N.P.B. *Sistemas tubulares para contenção de lodo e sedimentos contaminados*. 2005. 103f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

CHRISTOPHER, B. R.; HOLTZ, R. D. *Geotextile engineering manual*. [s.l.]: U.S. Federal Highway Administration. 1985. 1044 p. (Report nº FHWA-TS-86/203)

CORDEIRO, J.S. (2001) *Gerenciamento Integrado de Resíduos de Estações de Tratamento de Águas*. Anais... 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, cd, I – 062.

CORDEIRO, J.S. (2002) *Micro propriedades de Lodos Gerenciados em Decantadores de Estações de Tratamento de Água*. XXVIII Congresso Interamericanos de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México. Memoriais.

CORNWELL, D. A. *Water treatment plant waste management*. Denver. Environmental Engineering & Technology, Inc., AWWA Research Foundation, 1987

DIAS, L. M.; BATOLIONE, G.; MORAIS, F. U.; FERNANDES SOBRINHO, J.; RIBEIRO, M. C.; LISBOA, M. S. *Alternativa de Destinação Final do Lodo de Estação de Tratamento de Água - Fabricação de Blocos Cerâmicos*. In: XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2002, Cancun. XXVIII Congreso. México: AIDIS, 2002.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, D. B. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. 2ª. ed. São Carlos - SP: RIMA, v. 1 e 2, 2005.

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

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

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.

DI BERNARDO, L. & SABOGAL PAZ, L.P. (2008) *Seleção de tecnologias de tratamento de água*. v. 1 e 2. São Carlos: LDiBe. 1560 p.

DOE, P.W. (1990). “Waste Treatment Plant Waste Management.” In: Pontius, F.W. (ed.). *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*. 4ª edição. American Water Works Association. McGraw-Hill, Inc., E.U.A., 955-995.

FERREIRA, B. O.; VIANNA, M.R.. *Eficiência Do Desaguamento De Lodos De Decantadores E Água De Lavagem De Filtros De Estação De Tratamento De Água Através De Filtros*

Geotêxteis: Estudo De Caso. In: 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013, Goiânia.

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

FERREIRA FILHO, S. S., ALÉM SOBRINHO, P. (1998). *Considerações sobre o tratamento de despejos líquidos gerados em estações de tratamento de água*. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro. v. 3, n. 5, p. 128-136.

FREITAS, R. A. S. *Comportamento de geotêxteis como filtro em resíduos: fosfogeno e lama vermelha*. 122 f. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FREITAS, A. G. ; BASTOS, R. K. X. ; BEVILACQUA, P. D. ; PÁDUA, V. L. ; PIMENTA, J. F. P. ; ANDRADE, R. C. . *Recirculação de água de lavagem defiltros e perigos associados a protozoários*. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, p. 37-46, 2010.

FONTANA, A.O. *Sistema de Leito de Drenagem e Sedimentador como Solução para Redução de volume de Lodo de Decantadores e Reuso de Água de Lavagem de Filtros – Estudo de Caso – ETA Cardoso*. 164 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, 2004.

FOURIE, A. B.; JOHNS, D.; JONES, C. J. F. P. Dewatering of mine waste using electrokinetic geosynthetics. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 44, p. 160–172, 2007

FOWLER, J., Duke, M.L., SCHMIDT, M.L., CRABTREE, B., BAGBY, R.M., and Trainer, E. (2002). *Dewatering sewage sludge and hazardous sludge with geotextile tubes*. Seventh International Conference on Geosynthetics, 22-27 September 2002, Nice, French Riviera.

FOWLER, J.; BAGBY, R. M.; TRAINER, E. Dewatering sewage sludge with geotextile tubes. *Geotechnical Fabrics Report*, v. 15, n.7., p. 26-30, 1997.

FOWLER, J. et al. Geotextile contained dredged material, Red Eye Crossing, Baton Rouge, LA. In: *TECHNICAL CONFERENCE. WESTERN DREDGING ASSOCIATION*, 16., 1995. Proceedings...[S.l.: s.n.], 1995.

FOWLER, J.; BAGBY, R.M.; TRAINER, E. (1996). *Dewatering sewage sludge with geotextile tubes*. Proc. 49th Canadian Geotechnical Conference, St. John's New Foundland.

FOWLER, J.; LARKINS, K.; DUKE, M. (2005) *Dredging Aerobis Digested Biosolids into Geotextile Tubes for Dewatering*, New Orleans East Municipal Sewage Treatment Plant. , LA. New Orlean, LA.

GAFFNEY, D. A., MARTIM, S.M., M.H., BENNERT, T.A. *Dewatering Contaminated, fine-grained material using geotextiles*. SI Geosolutions, 1999

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

GIROUD, J. P. (1996) *Granular filters and geotextile filters*. Proceedings of Geofilters. Montreal, QB, pp 565 – 680.

GUIMARÃES, G. C. *Estudo do Adensamento e Desidratação dos Resíduos Gerados na ETA-Brasília*. 2007. 118 f 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. (2013). *Dewatering dludge in Geotextile closed systems: brazilian experiences*. Soils & Rocks, v. 36, p. 251-263.

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:10.1680/gein.14.00018

GUIMARÃES, M. G. A.; URASHIMA, D. C. ; VIDAL, D. M. . *Avaliação do Emprego de Sistemas Fechados de Geotêxteis como Alternativa para Disposição dos Resíduos Gerados nas Estações de Tratamento de Água*. In: XIV IWRA World Water Congress, 2011, Porto de Galinhas.

GRZELAK, M.S., MAURER, B.S., PULLEN, T.S., BHATIA, S.K., RAMARAO, B.V. (2011). *A Comparison of Test Methods Adopted for Assessing Geotextile Tube Dewatering Performance*. Conference Paper in Geotechnical Special Publication March 2011 DOI: 10.1061/41165(397)219.

GRI-GT15: 2009. *The pillow test for field assessment of fabrics/additives used for geotextile bags, containers, and tubes*. Geosynthetics Research Institute (GRI), Folsom, USA, 2009.

HERNANDES, E. M.; MOL, H. V.; ZANARIOLI, J. P.; CINTRA, O. A. *Tratamento de Lodo em Estações de Tratamento de Água Utilizando Dispositivos de Contensão em Geotecido e Adaptação em Carpete de Forração com Ráfia*. Encontro Técnico AESABESP. São Paulo. Brasil.2006.

HUDSON, H.E. (1981). *Water Clarification Processes: Practical Design and Evaluation*. New York, Van Nostrand Reinhold Co.

Instituto de Engenharia de São Paulo - IE (2008). Relatório do Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos Benéficos de Lodo de Estações de Tratamento de Água. In: *Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos Benéficos de Lodo de Estações de Tratamento de Água*, São Paulo, SP, Brasil. Anais eletrônicos.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística -IBGE. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico* 2008. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2008). *Geosynthetics - Guidelines for the assessment of durability: ISO TS 13434*. Switzerland.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2015). *Geosynthetics - Part 1: Terms and definitions*. ISO 10318-1. Switzerland. 8 p.

KOERNER, R. M. *Designing with geosynthetics*. Nova Jersey: Prentice Hall, 1999. 761p.

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. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS*, 8., 2006, Yokohama. Proceedings... Rotterdam : Millpress, 2006.

LAWSON C. R. (2008). Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynthetics International* 6 (15) 384-427. doi:10.1680/gein.2008.15.6.384

LESHCHINSKY, D. *et al.* Geosynthetic Tubes for Confining Pressurized Slurry: Some Design Aspects. *Journal of Geotechnical Engineering*, p. 682-690, 1996.

LESHCHINSKY, D., LESHCHINSKY, O. *Geosynthetic Confined Pressurized Slurry (GeoCoPS): Supplemental Notes: technical Report CPAE-GL-96-1*. Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, 54 p, 1996

LIBÂNIO, M.. *Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água*. 4ª Edição - Rev. e Amp. - 1a Ed. 2005). 4a. ed. Campinas: Editora Átomo, 2016. v. 1. 640p .

LIAO, K and 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. Proceedings Rotterdam: Millpress, 2006.

LOPES, M. P.; LOPES, M. L. A. (2010). *Durabilidade dos Geossintéticos*. Porto: FEUP Edições. 294 p.

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.

MARTINS, P. M. *Utilização de tubos de geotêxteis para o desaguamento de rejeitos de mineração*. 2006. 161 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

MAHMOUD, A. *et al.* *Electro-dewatering of wastewater sludge: Influence of the operating conditions and their interactions effects*. *Water Research*, v. 45, p. 2795–2810, 2011.

MIRATECH, T. C. N. (2005). *Geotube. Dewatering Technology: versão 5.2*. Seção: Aplicações: [S.l.]: Mining & Mineral Processing.

McTIGUE, N. E.; KOPPERS, H.M.M.; CORNWELL, D.A. (1990). Regulations, Characteristics, and Analytical Considerations. In: CORNWELL, D.A.; KOPPERS, H.M.M.; eds. *SLIB, ASCHLAMM, SLUDGE*. Denver, USA, American Water Works Association Research Foundation & JIWA Ltda., p.1-46.

- MENDONÇA, M. B. 2000. 332 f. *Avaliação da formação de ocre no desempenho de filtros geotêxteis*. Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.
- MENDES, R. L.; SCIAN, J. B.; FILHO, S. S. F. (2001). *Adensamento mecânico de lodos gerados em estações de tratamento de água*. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa. ABES. v. 1. p. 1-10.
- MORGAN, K. R. *Geotextile Tubes and Their Application to Dewatering*. 2014. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada) – Georgia Southern University, Statesboro
- MOREIRA, V. A. 2017. 128 f. *Degradação de geotêxteis aplicados no desaguamento de resíduos e expostos às condições climáticas de campo*. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Área de Concentração: Engenharia Geotécnica.
- MOREIRA, S. P.; CARNEIRO, J. R.; LOPES, M. L. (2010). *Effect of natural weathering on the water permeability behavior of nonwoven polypropylene geotextiles*. In: 9TH International Conference on Geosynthetics. Guarujá. Anais.
- 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: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:10.1016/S0266-1144(02)00008-0.
- MUÑOZ, C.S. *Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis*. 121f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.
- 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.
- ORTIZ, C. A. H. (2012). *Desempenho de geotêxteis na filtração de suspensões água solo*. Mestrado. Universidade de São Paulo. 113 p.
- 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 p
- PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. A. (2000). *Geotextiles in filtration: a state of the art review and remaining challenges*. International Symposium on Geosynthetics na Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Association with Geo Eng2000, Melbourne, 85 p.
- PIEPER, K. M.C. *Avaliação do Uso de Geossintético para o Deságüe e Geocontenção de Resíduos Sólidos de Estação de Tratamento de Água*. 2008. 129 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRG, Porto Alegre, 2008.
- RICHTER, C.A. *Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água*. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001

RIBEIRO, R.E.Y (2003). *Gestão Operacional em Estações de Tratamento de Água de Ciclo Completo, Estudo de Caso da ETA de Cubatão/SP*. XIV Encontro Técnico SABESP

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

SABOGAL PAZ, L.P. (2008) *Modelo Conceitual de Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água para Abastecimento de Comunidades de Pequeno Porte*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos. 509 p.

SPADA, J. L. G. (1991). *Ensaio de filtração em solos com geotêxteis*. Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

SILVA, L. C.F. (2017) *Utilização de Tubos Geotêxteis para Confinamento, Desaguamento e Empilhamento de rejeito de ouro*. Mestrado Geotecnia e Transportes, da Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Belo Horizonte, 160 p.

SILVEIRA, C. M. 2005. 119 f *Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis*. Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, 2005.

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

SHIN, E. C.; OH, Y. I. (2003). *Analysis of geotextile tube behavior by large-scale field model tests*. *Geosynthetics International*, 10, No. 4, p.134–141.

SHUKLA, S. K. (2002). *Geosynthetics and their applications*. Thomas Telford Publishing, London. 430 p.

SHUKLA, S. K.; YIN, J. (2006). *Fundamentals of Geosynthetic Engineering*. London: Taylor e Francis Group. 428 p.

SMOLLEN, M.; KAFAAR, A. (1994). *Electroosmotically Enhanced Sludge Dewatering: Pilot-Plant Study*. *Water Science Technology- IAWQ*, V.30, n. 8, p. 159-168

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: doi.org/10.1680/gein.2009.16.2.83

TOMINAGA, E. 2010. 127 f. *Análise dos Procedimentos para Avaliação de Desempenho de Sistemas fechados com Geotêxtil para Desaguamento*. Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, 2010.

USEPA - United States Environmental Protection Agency (2002), *Filter Backwash Recycling Rule – Technical Guidance Manual*. USEPA, E.U.A., 166p.

URASHIMA, D. C.; GUANAES, E. A.; GUIMARÃES, M. G. A.; PONTES, P. P.; VIDAL, D. M. (2010). *Laboratory studies on geotextiles tubes dewatering by pressure filtration test in reduced model*. 9th International Conference on Geosynthetics.

URASHIMA, D. C. *Dimensionamento de filtros têxteis por teoria probabilística*. 1996. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

VANZETTO, A. S. *Análise das Alternativas Tecnológicas de Desaguamento de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Esgoto*. 2012. 185 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

VERTEMATTI, L.C. *Manual Brasileiro de Geossintéticos*, Edgard Blucher, 2ª edição, São Paulo, 2015.

WOLFE, T.A., MICKLEY, M., NOVAK, J., HARMS, L., SORG, T.J. (1996). “Characterization of Water treatment plant residuals.” In: EPA, NRMRL, ASCE e AWWA (coord.) *Manuals and reports of engineering practice, n° 88 - management of water treatment plant residuals*. E.U.A., 41-72p.

APÊNDICE A

Análise da Variância e Modelos dos Ensaaios de Bancada

Tabela 35: Análise da variância (ANOVA) da Turbidez do Filtrado e Tempo de Desaguamento com GT2 e Polímero Catiônico

Turbidez do Filtrado (uT)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	463229405,8	3	154409801,9	42,3	0,000074
Resíduos	25531938,1	7	3647419,7		
Total	488761344,0	10			
*p≤0,10; % variação explicada (R ²) = 94,78% F _{0,10;3;7} = 3,07					
Tempo de Desaguamento (s)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	72092,2	1	72092,2	3,5	0,09263
Resíduos	183351,9	9	20372,4		
Total	255444,1	10			
*p≤0,10; % variação explicada (R ²) = 28,22% F _{0,10;1;9} = 3,36					

Fonte: Autor, 2019.

$$\text{Turbidez (uT)} = 2864,10 + 7780 x_1 + 5239,23 x_1^2 - 2049,25 x_2 \quad \text{Equação 14}$$

$$\text{Tempo de Desaguamento (s)} = 216,27 - 134,25 x_1 x_2 \quad \text{Equação 15}$$

Tabela 36: Análise da variância (ANOVA) da Turbidez do Filtrado e Tempo de Desaguamento com GT1 e Polímero Aniônico

Turbidez do Filtrado (uT)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	12601,6	3	4200,5	13,843	0,00249
Resíduos	2124,0	7	303,4		
Total	14725,6	10			
*p≤0,10; % variação explicada (R ²) = 85,58% F _{0,10;3;7} = 3,07					
Tempo de Desaguamento (s)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	842363,1	2	421181,5	15,34	0,00182
Resíduos	219518,5	8	27439,8		
Total	1061881,6	10			
*p≤0,10; % variação explicada (R ²) = 79,33% F _{0,10;2;8} = 3,11					

Fonte: Autor, 2019.

$$\text{Turbidez (uT)} = 45,58 - 28,68 x_1 + 43,24 x_1^2 + 21,24 x_2^2 \quad \text{Equação 16}$$

$$\text{Tempo de Desaguamento (s)} = 1184,60 + 208,67 x_1 - 461,60 x_1^2 \quad \text{Equação 17}$$

Tabela 37: Análise da variância (ANOVA) da Turbidez do Filtrado e Tempo de Desaguamento com GT2 e Polímero Aniônico

Turbidez do Filtrado (uT)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	132466,0	2	66233,0	6,66	0,01977
Resíduos	79473,8	8	9934,2		
Total	211939,8	10			
*p≤0,10; % variação explicada (R ²) = 62,50% F _{0,10;2;8} = 3,11					
Tempo de Desaguamento (s)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	320903,0	2	160451,5	22,3	0,00053
Resíduos	57525,4	8	7190,6		
Total	378428,5	10			
*p≤0,10; % variação explicada (R ²) = 84,80% F _{0,10;2;8} = 3,11					

Fonte: Autor, 2019.

$$\text{Turbidez (uT)} = 149,58 - 115,17 x_2 + 139,25 x_2^2 \quad \text{Equação 18}$$

$$\text{Tempo de Desaguamento (s)} = 412,80 + 175,17 x_1 - 223,97 x_1^2 \quad \text{Equação 19}$$

Tabela 38: Análise da variância (ANOVA) da Turbidez do Filtrado e Tempo de Desaguamento com GT1 e Não-Iônico

Turbidez do Filtrado (uT)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	87555,84	1	87555,84	5,86	0,0385
Resíduos	134365,88545 454547	9	14929,54282 8282829		
Total	221921,72545 454552	10			
*p≤0,10; % variação explicada (R ²) = 39,45% F _{0,10;1;9} = 3,36					
Tempo de Desaguamento (s)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	3457883,4	3	1152627,8	19,509	0,0008
Resíduos	413560,5	7	59080,07		
Total	3871444	10			
*p≤0,10; % variação explicada (R ²) = 89,32% F _{0,10;3;7} = 3,07					

Fonte: Autor, 2019.

$$\text{Turbidez (uT)} = 161,34 - 120,80 x_2 \quad \text{Equação 20}$$

$$\text{Tempo de Desaguamento (s)} = 1825,40 + 659 x_1 - 492,07 x_1^2 - 219 x_1 x_2 \quad \text{Equação 21}$$

Tabela 39: Análise da variância (ANOVA) da Turbidez do Filtrado e Tempo de Desaguamento com GT2 e Não-Iônico

Turbidez do Filtrado (uT)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	348753230,2	4	87188307,5	45,2	0,000128
Resíduos	11549726,4	6	1924954,4		
Total	360302956,7	10			
*p≤0,10; % variação explicada (R ²) = 96,79% F _{0,10;4;6} = 3,18					
Tempo de Desaguamento (s)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	347116,41666	3	115705,4722	165,7	7,30427
	666657		2222219		
Resíduos	4887,5	7	698,2		
Total	352004	10			
*p≤0,10; % variação explicada (R ²) = 98,61% F _{0,10;3;7} = 3,07					

Fonte: Autor, 2019.

$$\text{Turbidez (uT)} = 3818,80 + 5585,50 x_1 + 2122,37 x_1^2 - 3531,33 x_2 - 4314,50 x_1 x_2 \text{Equação 22}$$

$$\text{Tempo de Desaguamento (s)} = 231 + 230,33 x_1 + 51,50 x_2 + 56,75 x_1 x_2 \text{Equação 23}$$

APÊNDICE B

Resultados do Desaguamento na Instalação-Piloto

Tabela 40: Resultados do Ensaio 01 do desaguamento na Instalação Piloto

(continua)

ENSAIO 01								
1º ENCHIMENTO 19/09/2018 (tarde)			2º ENCHIMENTO 19/09/2018 (tarde)			3º ENCHIMENTO 19/09/2018 (tarde)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	19,4	5	1 min	274	4,1	1 min	362	6
2 min	86	6	2 min	114	5,7	2 min	158	6,6
3 min	87,4	6	3 min	116	6	3 min	122	6
4 min	89,2	6	4 min	120	6,1	4 min	101	6
5 min	96,6	6	5 min	107	6,1	5 min	98,4	6,1
10 min	81,8	30,2	10 min	138	19,8	10 min	94	30,7
15 min	92,2	30,1	15 min	127	30	15 min	90,6	30,9
20 min	96,3	23,1	20 min	128	22,2	20 min	89,1	30
25 min	127	26	25 min	128	30	25 min	93,9	30,9
30 min	147	26,5	30 min	132	30	30 min	84,2	30,9
35 min	139	28,9	35 min	155	28,9	35 min	95,8	30,8
40 min	259	28,1	40 min	128	29,6	40 min	119	32,8
50 min	146	60,5	50 min	128	59,2	50 min	117	53,8
60 min	161	60,1	60 min	105	59,9	60 min	110	55,2
70 min	132	59,8	70 min	160	60	70 min	110	61,2
80 min	133	59,2	80 min	129	58,5	80 min	110	60
90 min	168	58,1	90 min	126	59,9	90 min	56,9	7
100 min	202	58,7	100 min	125	60	100 min	-	-
110 min	135	59	110 min	133	61,2	110 min	-	-
120 min	136	58,8	120 min	96,8	58,9	120 min	-	-
130 min	148	58,9	130 min	105	58,7	130 min	-	-
140 min	156	29	140 min	121	34	140 min	-	-
150 min	30	2,7	140 min	8,66	2,8	140 min	-	-
160 min	7,29	0,78	140 min	3,7	1,7	140 min	-	-
Volume bombeado (L)	762,4		Volume bombeado (L)	795,2		Volume bombeado (L)	500	
Tempo de operação da bomba	2 h 16 min e 15 s		Tempo de operação da bomba	2 h 14 min e 20 s		Tempo de operação da bomba	1 h 19 min e 20 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 40 – Resultados do Ensaio 01 do desaguamento na Instalação Piloto

(Continua)

ENSAIO 01											
4º ENCHIMENTO			5º ENCHIMENTO			6º ENCHIMENTO			7º ENCHIMENTO		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	272	3	1 min	159	1,4	1 min	291	0,37	1 min	189	1,7
2 min	173	4,7	2 min	146	3,1	2 min	141	3,8	2 min	169	3,9
3 min	144	5,2	3 min	140	4,9	3 min	123	5,7	3 min	133	3,1
4 min	115	5,9	4 min	134	5,8	4 min	125	6	4 min	101	2
5 min	108	5,7	5 min	143	6,1	5 min	112	3,1	5 min	79,5	1,3
10 min	87,6	29	10 min	145	28,5	10 min	73,9	5,1	10 min	56,7	3,2
15 min	91,1	29,8	15 min	86,3	6,2	15 min	45,8	2,1	15 min	26	1,7
20 min	93,9	29,9	20 min	36,5	2,2	20 min	24,8	1,3	20 min	23	1,5
25 min	111	30,2	25 min	16,9	1,5	25 min	15	0,91	25 min	15,6	1
30 min	117	30,1	30 min	9,25	0,9	30 min	7,44	0,78	30 min	10	0,9
35 min	110	30,1	35 min	6,66	0,43	35 min	7,3	0,4	35 min	8,5	0,7
40 min	110	30	40 min	3,59	0,62	40 min	5,5	0,51	40 min	7,5	0,4
50 min	173	59,9	50 min	-	-	50 min	-	-	50 min	-	-
60 min	129	60	60 min	-	-	60 min	-	-	60 min	-	-
70 min	131	60	70 min	-	-	70 min	-	-	70 min	-	-
80 min	149	60	80 min	-	-	80 min	-	-	80 min	-	-
90 min	167	60	90 min	-	-	90 min	-	-	90 min	-	-
100 min	146	60	100 min	-	-	100 min	-	-	100 min	-	-
110 min	109	34	110 min	-	-	110 min	-	-	110 min	-	-
120 min	28,6	3,7	120 min	-	-	120 min	-	-	120 min	-	-
130 min	7,65	1,9	130 min	-	-	130 min	-	-	130 min	-	-
140 min	7	1	140 min	-	-	140 min	-	-	140 min	-	-
Volume bombeado (L)	638		Volume bombeado (L)	60		Volume bombeado (L)	27		Volume bombeado (L)	16 L	
Tempo de operação da bomba	1h 44 min e 5s		Tempo de operação da bomba	9 min e 15s		Tempo de operação da bomba	3min e 57s		Tempo de operação da bomba	1 min e 59 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 41: Resultados do Ensaio 02 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 02								
1º ENCHIMENTO 28/07/2018 (tarde)			2º ENCHIMENTO 28/07/2018 (tarde)			3º ENCHIMENTO 28/07/2018 (manhã)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	49,3	4,6	1 min	2660	1,2	1 min	964	0,75
2 min	72,2	4,7	2 min	838	2,2	2 min	1000	1,9
3 min	351	5,2	3 min	295	4,4	3 min	401	4
4 min	865	4,7	4 min	441	5,1	4 min	702	4,1
5 min	1300	4,5	5 min	366	3	5 min	219	1,8
10 min	1370	23,7	10 min	98,4	4,9	10 min	48,8	3,1
15 min	1230	23,4	15 min	53,3	2	15 min	22,6	1,6
20 min	1480	16	20 min	40,1	1,2	20 min	20,5	1
25 min	26,8	3,1	25 min	10,1	0,64	25 min	14,9	0,69
30 min	14,3	2,1	30 min	8,59	0,55	30 min	14,4	0,58
35 min	10,1	1,5	35 min	7,36	0,48	35 min	12	0,49
40 min	7,39	1	40 min	11,6	0,43	40 min	41,3	0,29
45 min	5,56	1,9	50 min	-	-	50 min	-	-
50 min	5,33	1,4	60 min	-	-		-	-
Volume bombeado (L)	106,5		Volume bombeado (L)	23,9		Volume bombeado (L)	19	
Tempo de operação da bomba	17 min e 53 s		Tempo de operação da bomba	4 min e 44 s		Tempo de operação da bomba	3 min e 13 s	
ENSAIO 02								
4º ENCHIMENTO 29/07/2018 (manhã)			5º ENCHIMENTO 29/07/2018 (manhã)			6º ENCHIMENTO 29/07/2018 (manhã)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	1840	2,4	1 min	1470	1,8	1 min	791	2
2 min	4020	1,7	2 min	604	3,1	2 min	283	2,8
3 min	977	3,7	3 min	189	3	3 min	54,3	0,78
4 min	830	4	4 min	51	1,1	4 min	17,8	0,44
5 min	891	4	5 min	30,9	0,66	5 min	15,4	0,31
10 min	926	14	10 min	19,6	1,8	10 min	7,38	1,1
15 min	27,1	2,2	15 min	7,52	0,74	15 min	3,09	0,54
20 min	12,5	1,1	20 min	3,54	0,49	20 min	2,48	0,5
25 min	7,86	0,8	25 min	3,29	0,39	25 min	1,72	0,4
30 min	4,87	0,61	30 min	2,09	0,33	30 min	1,93	0,34
35 min	3,94	0,48	35 min	1,72	0,29	35 min	1,55	0,29
40 min	3,12	0,41	40 min	3,1	0,29	40 min	2,46	0,26
Volume bombeado (L)	39,32		Volume bombeado (L)	12		Volume bombeado (L)	8	
Tempo de operação da bomba	7 min e 39 s		Tempo de operação da bomba	2 min e 9 s		Tempo de operação da bomba	1 min e 15 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 42: Resultados do Ensaio 03 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 03											
1º ENCHIMENTO 12/09/2018 (manhã)			2º ENCHIMENTO 13/09/2018 (manhã)			3º ENCHIMENTO 13/09/2018 (tarde)			4º ENCHIMENTO 13/09/2018 (tarde)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	21,2	8	1 min	1385	2,8	1 min	37,4	1	1 min	40,3	1
2 min	71,7	6	2 min	233	6	2 min	32,5	3	2 min	33,6	1,6
3 min	57,6	6	3 min	54,9	6,25	3 min	25	4,9	3 min	27,2	2,8
4 min	54,1	6	4 min	25,5	6,3	4 min	21,8	5,1	4 min	20,4	3,7
5 min	56,3	6	5 min	20,2	6,3	5 min	21,9	5,1	5 min	11,9	2
10 min	42,2	30	10 min	15,9	31,6	10 min	7,39	7,6	10 min	3,95	4,1
15 min	58,6	30	15 min	13,5	31,8	15 min	1,24	2,9	15 min	1,33	2,6
20 min	72,9	30	20 min	29,1	31,6	20 min	1,1	2,1	20 min	1,09	1,9
25 min	93,1	30	25 min	13	30,9	25 min	0,99	1,9	25 min	1,05	1,6
30 min	109	30	30 min	18,1	31,8	30 min	2,19	1,4	30 min	0,97	1,2
35 min	108	30	35 min	31,3	31,2	35 min	1,06	1,2	35 min	3,27	1,1
40 min	96,8	30	40 min	35,4	32	40 min	1,19	1,4	40 min	1,05	1
50 min	112	60	50 min	17,8	61,5	50 min	-	-	-	-	-
60 min	124	60	60 min	31,9	60	60 min	-	-	-	-	-
70 min	124	60	70 min	29,2	60,3	70 min	-	-	-	-	-
80 min	125	60	80 min	36,7	60,2	80 min	-	-	-	-	-
90 min	138	60	90 min	24,8	49,2	90 min	-	-	-	-	-
100 min	144	60	100 min	2,34	9,1	100 min	-	-	-	-	-
110 min	145	60	110 min	1,34	3,2	110 min	-	-	-	-	-
120 min	148	60	120 min	1,36	2,1	120 min	-	-	-	-	-
130 min	133	60	130 min	2,98	1,3	130 min	-	-	-	-	-
140 min	180	29	140 min	2,45	0,69	140 min	-	-	-	-	-
150 min	180	2,7	150 min	-	0,69	140 min	-	-	-	-	-
160 min	180	0,78	160 min	-	0,69	140 min	-	-	-	-	-
Volume bombeado (L)	800		Volume bombeado (L)	568,7		Volume bombeado (L)	41		Volume bombeado (L)	24	
Tempo de operação da bomba	2 h e 13 min e 12 s		Tempo de operação da bomba	1 h 26 min e 50 s		Tempo de operação da bomba	5 min		Tempo de operação da bomba	3 min e 6 s	
ENSAIO 03											
5º ENCHIMENTO 13/09/2018 (tarde)			6º ENCHIMENTO 14/09/2018 (manhã)			7º ENCHIMENTO 14/09/2018 (manhã)			8º ENCHIMENTO 14/09/2018 (manhã)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	9,81	0,82	1 min	110	0,63	1 min	44,7	1,1	1 min	22	1
2 min	35,9	3	2 min	63,8	1,9	2 min	22	2,1	2 min	15,6	2,3
3 min	42	5,5	3 min	36,3	3	3 min	6,13	1,7	3 min	5,65	0,96
4 min	20,5	4,1	4 min	22,7	3,5	4 min	5,73	0,9	4 min	3,72	0,7
5 min	7,4	1,5	5 min	21,3	4,1	5 min	2,67	0,6	5 min	2,22	0,58
10 min	2,7	4	10 min	25,3	19,1	10 min	2,22	2,3	10 min	3,05	2
15 min	1,04	2,5	15 min	9,73	4,1	15 min	1,96	1,6	15 min	0,57	1,5
20 min	0,86	1,9	20 min	2,55	2	20 min	2,91	1,2	20 min	0,77	1,3
25 min	0,8	1,5	25 min	1,55	1,3	25 min	2,5	1,1	25 min	0,8	1
30 min	0,6	1,1	30 min	1,88	1,1	30 min	1,54	1	30 min	0,78	0,95
35 min	0,5	1	35 min	1,09	0,87	35 min	0,73	0,81	35 min	0,7	0,75
40 min	0,83	0,9	40 min	0,85	0,74	40 min	0,69	0,73	40 min	0,6	0,7
50 min	-	-	-	-	-	50 min	1,23	1,3	50 min	-	-
60 min	-	-	-	-	-	60 min	0,49	1,5	60 min	-	-
Volume bombeado (L)	25,5		Volume bombeado (L)	51		Volume bombeado (L)	17		Volume bombeado (L)	16	
Tempo de operação da bomba	3 min		Tempo de operação da bomba	8 min e 25 s		Tempo de operação da bomba	1 min 25 s		Tempo de operação da bomba	1 min e 20 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 43: Resultados do Ensaio 04 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 04														
1º ENCHIMENTO 27/07/2018 (manhã)			2º ENCHIMENTO 27/07/2018 (manhã)			3º ENCHIMENTO 28/07/2018 (manhã)			4º ENCHIMENTO 28/07/2018 (manhã)			5º ENCHIMENTO 28/07/2018 (manhã)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	641	2,8	1 min	34,2	2,6	1 min	18,6	2,9	1 min	22	2,5	1 min	15	2
2 min	132	3,5	2 min	12,7	3,8	2 min	12,4	4	2 min	22,9	4,6	2 min	18,4	3,2
3 min	52,3	5	3 min	7,79	4	3 min	9,73	4,5	3 min	20,4	3	3 min	14,8	1,9
4 min	42,6	5,8	4 min	5,19	5,1	4 min	17,6	4,5	4 min	18,1	2	4 min	14	1
5 min	25,2	5,2	5 min	5,25	4,9	5 min	23,8	5	5 min	10,2	0,31	5 min	13,1	0,45
10 min	15	27	10 min	3,88	24,8	10 min	32,2	14,8	10 min	4,23	0,49	10 min	3,44	0,39
15 min	10	22,7	15 min	2,4	2,5	15 min	5,36	1,1	15 min	2,41	0,24	15 min	1,49	0,19
20 min	11,8	23,1	20 min	1,96	0,63	20 min	3,57	0,42	20 min	3,68	0,17	20 min	1,48	0,12
25 min	6,14	23,1	25 min	2,84	0,42	25 min	2,06	0,3	25 min	2	0,13	25 min	2,6	0,09
30 min	2,37	5	30 min	1,77	0,34	30 min	1,57	0,21	30 min	3,38	0,1	30 min	1,45	0,08
35 min	6,62	1,3	35 min	1,45	0,27	35 min	1,37	0,18	35 min	1,61	0,09	35 min	2,19	0,07
40 min	4,32	1	40 min	2,95	0,23	40 min	1,68	0,15	40 min	1,87	0,08	40 min	2,05	0,06
50 min	2,97	1,3	50 min	-	-									
60 min	1,71	0,58	60 min	-	-									
Volume bombeado (L)	138		Volume bombeado (L)	57,5		Volume bombeado (L)	38,5		Volume bombeado (L)	10		Volume bombeado (L)	8	
Tempo de operação da bomba	24 min e 15 s		Tempo de operação da bomba	8 min e 40 s		Tempo de operação da bomba	6 min e 50 s		Tempo de operação da bomba	1 min e 45 s		Tempo de operação da bomba	1 min e 17 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 44: Resultados do Ensaio 05 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 05														
1º ENCHIMENTO 18/09/2018 (tarde)			2º ENCHIMENTO 18/09/2018 (tarde)			3º ENCHIMENTO 18/09/2018 (tarde)			4º ENCHIMENTO 18/09/2018 (tarde)			5º ENCHIMENTO 18/09/2018 (tarde)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	185	23,5	1 min	242	15	1 min	196	17	1 min	155	15,1	1 min	114	19,1
2 min	200	19,8	2 min	143	28,1	2 min	124	28,8	2 min	88,5	6,7	2 min	94	7,9
3 min	195	30,9	3 min	117	31,4	3 min	103	19,8	3 min	58,7	2,8	3 min	55,9	2,5
4 min	162	32,3	4 min	109	32,6	4 min	58,7	3	4 min	44,8	1,5	4 min	37,2	1,5
5 min	138	34,1	5 min	104	34	5 min	39,6	1,4	5 min	28,4	1,1	5 min	24	0,94
10 min	159	176,2	10 min	105	50,3	10 min	23,1	2,9	10 min	18,4	2,6	10 min	11,6	2,6
15 min	251	101,7	15 min	23,8	3	15 min	11,2	1,4	15 min	5,33	1,4	15 min	5,27	1,5
20 min	20,5	2,9	20 min	14,7	1,4	20 min	6,63	0,77	20 min	5,8	0,91	20 min	5,01	1
25 min	12,3	1,12	25 min	9,54	0,69	25 min	5,75	0,56	25 min	5	0,7	25 min	4,78	0,8
30 min	6,56	0,6	30 min	9,25	0,39	30 min	5	0,5	30 min	4,5	0,4	30 min	4,2	0,55
35 min	6,02	0,45	35 min	7,93	0,22	35 min	4,5	0,4	35 min	4,1	0,2	35 min	4	0,25
40 min	3,33	0,21	40 min	5,83	0,11	40 min	4,3	0,3	40 min	3,99	0,15	40 min	3,53	0,1
Volume bombeado (L)	440		Volume bombeado (L)	240		Volume bombeado (L)	78		Volume bombeado (L)	36		Volume bombeado (L)	9	
Tempo de operação da bomba	1 min e 12 s		Tempo de operação da bomba	5 min e 51 s		Tempo de operação da bomba	1 min e 45 s		Tempo de operação da bomba	33 s		Tempo de operação da bomba	37 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 45: Resultados do Ensaio 06 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 06								
1º ENCHIMENTO 29/07/2018 (tarde)			2º ENCHIMENTO 29/07/2018 (tarde)			3º ENCHIMENTO 29/07/2018 (tarde)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	267	10,6	1 min	493	3	1 min	269	1,9
2 min	1980	6,5	2 min	72,1	3,1	2 min	90,1	2,2
3 min	1184	9	3 min	14,3	1,8	3 min	23,5	1,1
4 min	130	3,9	4 min	8,59	1,7	4 min	14,1	0,8
5 min	19	2	5 min	5,88	0,39	5 min	10	0,65
10 min	7,78	4,9	10 min	5,99	2,9	10 min	8,04	2,2
15 min	5,71	3	15 min	3,18	2	15 min	5,99	1,7
20 min	4,56	2	20 min	2,21	1,2	20 min	3,83	1,3
25 min	4,41	1,7	25 min	2,63	1,1	25 min	2,19	0,92
30 min	4,25	1,1	30 min	2,1	0,91	30 min	2,8	0,78
35 min	3,45	1	35 min	1,87	0,81	35 min	2,32	0,68
40 min	2,89	0,83	40 min	1,36	0,69	40 min	2,3	0,63
Volume bombeado (L)	55	25	Volume bombeado (L)	42,2	14,8	Volume bombeado (L)	9	11
Tempo de operação da bomba	2 min e 10 s		Tempo de operação da bomba	24 s		Tempo de operação da bomba	19 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 46: Resultados do Ensaio 07 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 07											
1° ENCHIMENTO 11/09/2018 (manhã)			2° ENCHIMENTO 11/09/2018 (manhã)			3° ENCHIMENTO 11/09/2018 (manhã)			4° ENCHIMENTO 11/09/2018 (tarde)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	108	26	1 min	210	15,8	1 min	113	15,8	1 min	99,9	6,1
2 min	76,6	29	2 min	117	23,2	2 min	39,5	5,1	2 min	30,3	3,8
3 min	72,4	31	3 min	41,4	4,5	3 min	15	2,3	3 min	17,9	2
4 min	66,6	32,7	4 min	11,6	1,9	4 min	13,3	1,3	4 min	9,29	1,3
5 min	71,9	33,5	5 min	10,1	1,1	5 min	10,3	1,1	5 min	6,95	0,75
10 min	46	170,4	10 min	5,34	3,1	10 min	5,02	1,9	10 min	4,16	2,3
15 min	37,7	173,8	15 min	3,47	1,8	15 min	3,25	1,1	15 min	3,24	1,5
20 min	365	12,2	20 min	1,67	0,99	20 min	1,66	0,81	20 min	1,38	0,94
25 min	8,12	2,2	25 min	1,29	0,64	25 min	2,26	0,7	25 min	1,58	0,83
30 min	3,9	1	30 min	1,24	0,4	30 min	1,21	0,59	30 min	1,98	0,68
35 min	5,24	0,38	35 min	5,03	0,25	35 min	0,67	0,52	35 min	1,53	0,54
40 min	10,5	0,16	40 min	1,68	0,16	40 min	1,54	0,42	40 min	0,7	0,44
Volume bombeado (L)	554,9		Volume bombeado (L)	450		Volume bombeado (L)	40		Volume bombeado (L)	26	
Tempo de operação da bomba	13 min e 14 s		Tempo de operação da bomba	24 s		Tempo de operação da bomba	19 s		Tempo de operação da bomba	12 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 47: Resultados do Ensaio 08 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 08														
1° ENCHIMENTO 24/07/ 2018 (Tarde)			2° ENCHIMENTO 24/07/ 2018 (Tarde)			3° ENCHIMENTO 24/07/ 2018 (Tarde)			4° ENCHIMENTO 25/07/ 2018 (manhã)			5° ENCHIMENTO 25/07/ 2018 (manhã)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	55,9	17,8	1 min	40,1	17	1 min	63,1	14,8	1 min	48,6	6	1 min	43,9	4
2 min	53,7	25,8	2 min	46,3	16,8	2 min	64,8	9	2 min	45,6	2,8	2 min	38,4	2,4
3 min	45,3	27,7	3 min	24	2,9	3 min	47,1	2,8	3 min	37,8	1,8	3 min	28,3	1,5
4 min	36,3	19,99	4 min	13,9	0,8	4 min	29,6	1,5	4 min	34,7	1,04	4 min	24,6	1,2
5 min	24,7	5,2	5 min	15,6	0,45	5 min	16,4	0,65	5 min	34	0,87	5 min	22,6	0,73
10 min	7,96	3,2	10 min	4,54	0,88	10 min	8,37	1,2	10 min	28,5	3	10 min	23,4	2,4
15 min	8,26	1,8	15 min	3,6	0,47	15 min	3,85	0,5	15 min	22,6	1,9	15 min	18,2	2
20 min	10,9	0,75	20 min	3,89	0,36	20 min	1,68	0,29	20 min	9,84	0,39	20 min	17	2,1
25 min	5,79	0,49	25 min	2,87	0,29	25 min	2,24	0,28	25 min	5,23	0,21	25 min	7,1	0,44
30 min	3,47	0,34	30 min	3,18	0,29	30 min	1,96	0,24	30 min	2,64	0,16	30 min	3,94	0,24
35 min	7,46	0,23	35 min	3,19	0,28	35 min	3,27	0,21	35 min	1,84	0,12	35 min	2,4	0,19
40 min	2,98	0,15	40 min	3,07	0,26	40 min	1,11	0,18	40 min	2,33	0,11	40 min	2,29	0,15
Volume bombeado (L)	116,2		Volume bombeado (L)	40,3		Volume bombeado (L)	28		Volume bombeado (L)	15,9		Volume bombeado (L)	15,7	
Tempo de operação da bomba	2 min e 25 s		Tempo de operação da bomba	34 s		Tempo de operação da bomba	20 s		Tempo de operação da bomba	13 s		Tempo de operação da bomba	5 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 48: Resultados do Ensaio 09 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 09											
1° ENCHIMENTO 14/09/2018 (manhã)			2° ENCHIMENTO 14/09/2018 (manhã)			3° ENCHIMENTO 14/09/2018 (manhã)			4° ENCHIMENTO 14/09/2018 (manhã)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	87,2	20,7	1 min	162	8	1 min	10	10	1 min	7,8	7,8
2 min	76,6	20,7	2 min	148	19,9	2 min	8,6	8,6	2 min	7,2	7,2
3 min	85,4	20,7	3 min	90,1	9	3 min	3,4	3,4	3 min	3	3
4 min	77,5	20,7	4 min	45,8	3,1	4 min	1,9	1,9	4 min	1,9	1,9
5 min	92,7	21,75	5 min	29,3	1,9	5 min	1,3	1,3	5 min	1,1	1,1
10 min	87,1	109,5	10 min	13,4	4	10 min	3,6	3,6	10 min	3,2	3,2
15 min	74,4	90,1	15 min	3,07	2	15 min	1,9	1,9	15 min	1,9	1,9
20 min	64,8	93	20 min	3,86	1,6	20 min	1,5	1,5	20 min	1,7	1,7
25 min	47,4	109	25 min	3,42	1,1	25 min	1	1	25 min	1,1	1,1
30 min		76,5	30 min	2,48	0,63	30 min	0,73	0,73	30 min	0,85	0,85
35 min	10,4	5,8	35 min	1,29	0,48	35 min	0,54	0,54	35 min	0,69	0,69
40 min	2,49	2,6	40 min	1,45	0,28	40 min	0,41	0,41	40 min	0,51	0,51
Volume bombeado (L)	600		Volume bombeado (L)	54		Volume bombeado (L)	36,5		Volume bombeado (L)	18	
Tempo de operação da bomba	28 min		Tempo de operação da bomba	1 min e 50 s		Tempo de operação da bomba	1 min e 1 s		Tempo de operação da bomba	50 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 49: Resultados do Ensaio 10 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 10											
1° ENCHIMENTO 25/07/2018 (tarde)			2° ENCHIMENTO 25/07/2018 (tarde)			3° ENCHIMENTO 26/07/2018 (manhã)			4° ENCHIMENTO 26/07/2018 (manhã)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	1847,5	7	1 min	85,7	4,1	1 min	46	2,4	1 min	80,4	7
2 min	19,5	13	2 min	42,4	11	2 min	12	8,6	2 min	7,63	4,8
3 min	4,74	18,1	3 min	6,32	7,1	3 min	8	4,1	3 min	8,55	2,5
4 min	3,89	18	4 min	3,69	2,8	4 min	8,37	2	4 min	9,65	1,1
5 min	5,06	18,9	5 min	3,27	1,5	5 min	8,25	1,2	5 min	6,18	0,82
10 min	2,1	15,2	10 min	3,54	2,2	10 min	3,96	2,8	10 min	6,07	2
15 min	10,9	2,4	15 min	4,75	0,74	15 min	3,51	1,2	15 min	2,71	0,75
20 min	1,95	0,91	20 min	1,45	0,43	20 min	1,72	0,645	20 min	2,73	0,85
25 min	2,38	0,58	25 min	2,08	0,35	25 min	2,33	0,445	25 min	2,2	0,31
30 min	1,48	0,35	30 min	1,13	0,28	30 min	2,92	0,32	30 min	2,01	0,32
35 min	2,07	0,23	35 min	1,54	0,24	35 min	2,03	0,25	35 min	1,64	0,24
40 min	1,21	0,15	40 min	1,79	0,2	40 min	2,81	0,2	40 min	1,29	0,22
Volume bombeado (L)	100		Volume bombeado (L)	33,2		Volume bombeado (L)	22,9		Volume bombeado (L)	40	
Tempo de operação da bomba	4 min e 45"		Tempo de operação da bomba	1 min e 30"		Tempo de operação da bomba	1 min e 15"		Tempo de operação da bomba	21 s	
ENSAIO 10											
5° ENCHIMENTO 26/07/2018 (manhã)			6° ENCHIMENTO 26/07/2018 (manhã)			7° ENCHIMENTO 26/07/2018 (tarde)					
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)			
1 min	186	3,2	1 min	49,7	3	1 min	32,6	3			
2 min	27,4	4,1	2 min	7,61	3,1	2 min	6,73	2,1			
3 min	4,82	2	3 min	5,87	1,6	3 min	6,34	1,7			
4 min	4,21	1,3	4 min	5,55	0,85	4 min	5,04	0,95			
5 min	3,48	0,81	5 min	4,6	0,72	5 min	7,78	0,66			
10 min	3,11	2	10 min	3,52	2	10 min	3,82	2,6			
15 min	2,08	0,855	15 min	2,32	1,4	15 min	2,14	1,4			
20 min	1,62	0,56	20 min	1,58	0,65	20 min	1,52	0,67			
25 min	2,6	0,38	25 min	1,24	0,52	25 min	1,13	0,45			
30 min	1,38	0,3	30 min	1,16	0,41	30 min	1,45	0,33			
35 min	1,04	0,24	35 min	1,06	0,3	35 min	1,03	0,26			
40 min	1,86	0,14	40 min	1,14	0,23	40 min	1,59	0,23			
Volume bombeado (L)	17,2		Volume bombeado (L)	14,9		Volume bombeado (L)	14,5				
Tempo de operação da bomba	37 s		Tempo de operação da bomba	28 s		Tempo de operação da bomba	10 s				

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 50: Resultados do Ensaio 11 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 11											
1º ENCHIMENTO 17/08/2018 (manhã)			2º ENCHIMENTO 17/08/2018 (manhã)			3º ENCHIMENTO 17/08/2018 (manhã)			4º ENCHIMENTO 17/08/2018 (tarde)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	1140	12,9	1 min	1070	5,6	1 min	669	5,1	1 min	600	4,1
2 min	1060	17,5	2 min	837	9,3	2 min	86,9	7,9	2 min	102	6,5
3 min	1390	15,8	3 min	24,3	3,9	3 min	19,8	3,2	3 min	30	2,9
4 min	2390	15,3	4 min	16,9	2,2	4 min	26,4	2	4 min	29,4	1,5
5 min	468	7,8	5 min	27,8	1,6	5 min	25,5	1,1	5 min	20,4	1
10 min	17,6	9,7	10 min	22,7	3,5	10 min	7,61	2	10 min	15,3	1,9
15 min	8,56	2,2	15 min	5,18	0,99	15 min	2,31	0,65	15 min	8,5	0,6
20 min	6,68	1,3	20 min	2,8	0,51	20 min	1,7	0,43	20 min	5,5	0,38
25 min	2,3	0,61	25 min	1,89	0,48	25 min	1,46	0,35	25 min	2,5	0,33
30 min	1,77	0,42	30 min	1,41	0,35	30 min	1,56	0,35	30 min	1,9	0,3
35 min	2,21	0,36	35 min	1,89	0,28	35 min	1,69	0,27	35 min	1,5	0,25
40 min	3,34	0,28	40 min	1,99	0,2	40 min	1,37	0,23	40 min	1,45	0,15
Volume bombeado (L)	88,5		Volume bombeado (L)	28,2		Volume bombeado (L)	23		Volume bombeado (L)	13	
Tempo de operação da bomba	3 min e 55 s		Tempo de operação da bomba	1 min e 14 s		Tempo de operação da bomba	51 s		Tempo de operação da bomba	1 min e 28 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 51: Resultados do Ensaio 12 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 12														
1º ENCHIMENTO 30/07/2018 (manhã)			2º ENCHIMENTO 30/07/2018 (manhã)			3º ENCHIMENTO 30/07/2018 (manhã)			4º ENCHIMENTO 31/07/2018 (tarde)			5º ENCHIMENTO 31/07/2018 (tarde)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	60,7	15,9	1 min	41	7	1 min	31,9	4,5	1 min	33,9	3,9	1 min	14,4	2,1
2 min	36,5	18,2	2 min	40,8	6,9	2 min	31,8	3,1	2 min	30,2	3,8	2 min	14,3	2,2
3 min	23,7	22	3 min	28,7	2,8	3 min	26,3	1,9	3 min	25,8	2	3 min	11,4	1,4
4 min	15,2	23	4 min	22,6	1,7	4 min	20,1	1,2	4 min	22,6	1,6	4 min	10,3	1,2
5 min	12,9	20,1	5 min	18,9	1,2	5 min	18	0,85	5 min	21	1,2	5 min	8,97	0,59
10 min	20,8	74,2	10 min	15,1	3,4	10 min	15,7	2,9	10 min	17,4	3,3	10 min	7,23	2,4
15 min	10,6	5	15 min	8,17	1,7	15 min	10,8	1,8	15 min	12	1,9	15 min	4,71	1,1
20 min	4,45	2,1	20 min	5,49	1,1	20 min	7,17	1,2	20 min	9,07	1	20 min	3,49	0,72
25 min	4,08	1,4	25 min	2,44	0,63	25 min	5,16	0,78	25 min	7,32	0,68	25 min	3,36	0,58
30 min	5	1,1	30 min	1,96	0,48	30 min	4,65	0,69	30 min	6,33	0,62	30 min	3,11	0,56
35 min	2,37	0,52	35 min	1,87	0,38	35 min	3,72	0,56	35 min	5,76	0,51	35 min	3,16	0,49
40 min	7,85	0,33	40 min	2,7	0,31	40 min	2,9	0,43	40 min	4,91	0,45	40 min	2,63	0,38
Volume bombeado (L)	185		Volume bombeado (L)	49		Volume bombeado (L)	22		Volume bombeado (L)	21		Volume bombeado (L)	13,5	
Tempo de operação da bomba	8 min e 26 s		Tempo de operação da bomba	58 s		Tempo de operação da bomba	36 s		Tempo de operação da bomba	44 s		Tempo de operação da bomba	15 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 52: Resultados do Ensaio 13 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 13											
1º ENCHIMENTO 17/08/2018 (manhã)			2º ENCHIMENTO 17/08/2018 (manhã)			3º ENCHIMENTO 17/08/2018 (manhã)			4º ENCHIMENTO 17/08/2018 (Tarde)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	19,3	5,5	1 min	447	1,9	1 min	130	1,2	1 min	61,9	0,89
2 min	59	5,5	2 min	112	3	2 min	47,7	1,9	2 min	7,76	1,9
3 min	26,9	6	3 min	30,7	2,9	3 min	27,8	2,1	3 min	3,42	1,8
4 min	20	5,7	4 min	13,1	4,8	4 min	5,04	1,1	4 min	2,88	0,78
5 min	13	5,8	5 min	93,9	5,5	5 min	3,19	0,76	5 min	2,13	0,61
10 min	12,7	27,2	10 min	25,4	18	10 min	2,24	2,6	10 min	1,53	2,1
15 min	27,8	28,1	15 min	4,39	3,8	15 min	2,68	1,9	15 min	1,61	1,3
20 min	45,8	27,1	20 min	3,38	2,1	20 min	2,56	1,5	20 min	1,57	1,1
25 min	100	27,8	25 min	2,83	0,91	25 min	2,07	1,2	25 min	1,47	0,82
30 min	231	26,9	30 min	1,58	0,43	30 min	1,58	0,8	30 min	1,45	0,74
35 min	77,1	23,3	35 min	1,31	0,26	35 min	1,98	0,64	35 min	1,4	0,6
40 min	37,1	19	40 min		0,24	40 min	1,99	0,53	40 min	1,38	0,5
Volume bombeado (L)	184		Volume bombeado (L)	42,2		Volume bombeado (L)	14,2		Volume bombeado (L)	9	
Tempo de operação da bomba	37 min e 40 s		Tempo de operação da bomba	7 min e 28 s		Tempo de operação da bomba	2 min e 18 s		Tempo de operação da bomba	1 min e 28 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 53: Resultados do Ensaio 14 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 14											
1º ENCHIMENTO 10/08/2018 (manhã)			2º ENCHIMENTO 08/08/2018 (manhã)			3º ENCHIMENTO 08/08/2018 (tarde)			4º ENCHIMENTO 09/08/2018 (tarde)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	36,7	22,3	1 min	26,3	14,2	1 min	18,5	5,9	1 min	96,4	5,8
2 min	8,37	26,1	2 min	10,2	4,9	2 min	6,89	2,6	2 min	8,72	2,3
3 min	7,06	28,8	3 min	7,41	1,9	3 min	6,79	1,6	3 min	7,97	1,5
4 min	6,44	29,9	4 min	5,09	1	4 min	5,74	1,1	4 min	6,49	1,1
5 min	6,39	13,9	5 min	3,88	0,6	5 min	4,92	0,78	5 min	5,44	0,86
10 min	4,15	5,4	10 min	3,36	1,9	10 min	3,52	2,4	10 min	4,13	2,6
15 min	2,59	2,5	15 min	2,24	1,1	15 min	2,64	1,2	15 min	2,49	1,5
20 min	2,79	1	20 min	2,05	0,82	20 min	1,83	0,85	20 min	2,01	0,53
25 min	1,53	0,62	25 min	2,11	0,59	25 min	1,84	0,61	25 min	1,99	0,65
30 min	1,76	0,36	30 min	2,41	0,44	30 min	2,4	0,47	30 min	1,58	0,51
35 min	1,68	0,31	35 min	1,12	0,3	35 min	2,58	0,36	35 min	2,39	0,42
40 min	1,22	0,18	40 min	1,19	0,19	40 min	3,11	0,31	40 min	4,11	0,39
Volume bombeado (L)	138		Volume bombeado (L)	28,1		Volume bombeado (L)	18,5		Volume bombeado (L)	16	
Tempo de operação da bomba	3 min e 30 s		Tempo de operação da bomba	31 s		Tempo de operação da bomba	18 s		Tempo de operação da bomba	7 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 54: Resultados do Ensaio 15 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 15								
1º ENCHIMENTO 13/07/2018 (manhã)			2º ENCHIMENTO 13/07/2018 (noite)			3º ENCHIMENTO 14/07/2018 (manhã)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	279	13,4	1 min	33,2	4,5	1 min	573	5,8
2 min	23,3	14,5	2 min	55,6	13,8	2 min	59,2	12,5
3 min	7,27	19,8	3 min	112	12	3 min	11	3,5
4 min	12,8	20,3	4 min	68,7	11,1	4 min	8	1,8
5 min	16,1	19,7	5 min	114	11	5 min	5,19	1,1
6 min	18	15,2	6 min	-	-	6 min	-	-
10 min	8,37	6,8	10 min	230	25,3	10 min	3,83	3
15 min	3,97	2,8	15 min	2,74	3,1	15 min	2	1,47
20 min	3,34	1,349	20 min	1,83	2	20 min	1,8	0,92
25 min	2,09	0,74	25 min	1,4	1,5	25 min	1,59	0,499
30 min	2,42	0,4	30 min	1,34	0,899	30 min	3,74	0,359
35 min	3,23	0,2	35 min	1,55	0,685	35 min	2,64	0,285
40 min	2,21	0,12	40 min	1,36	0,5	40 min	3,79	0,24
Volume bombeado (L)	100		Volume bombeado (L)	86		Volume bombeado (L)	31,2	
Tempo de operação da bomba	5 min 19 s		Tempo de operação da bomba	6 min 13 s		Tempo de operação da bomba	1 min 15 s	
ENSAIO 15								
4º ENCHIMENTO 14/07/2018 (noite)			5º ENCHIMENTO 15/07/2018 (manhã)			6º ENCHIMENTO 15/07/2018 (Noite)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	67,7	7,7	1 min	178	5	1 min	75,9	7,95
2 min	89,8	12,8	2 min	59,5	6	2 min	11,4	4,9
3 min	13,1	3,3	3 min	4,98	2,85	3 min	5,56	2,8
4 min	5,73	1,9	4 min	3,93	1,31	4 min	6,58	1,5
5 min	5,21	1,1	5 min	3,41	1,02	5 min	5,08	1
10 min	3,52	3,6	10 min	3,47	3	10 min	3,36	2,5
15 min	3,57	1,1	15 min	2,97	1,21	15 min	2,34	1,04
20 min	2,5	0,71	20 min	2,6	0,655	20 min	1,72	0,65
25 min	1,39	0,44	25 min	2,71	0,45	25 min	2,62	0,295
30 min	1,15	0,34	30 min	1,47	0,33	30 min	2,88	0,22
35 min	1,59	0,25	35 min	1,48	0,3	35 min	2,66	0,19
40 min	1,58	0,199	40 min	1,45	0,25	40 min	6,5	0,15
Volume bombeado (L)	35,5		Volume bombeado (L)	26		Volume bombeado (L)	40	
Tempo de operação da bomba	1 min 10 s		Tempo de operação da bomba	45 s		Tempo de operação da bomba	40 s	
ENSAIO 15								
7º ENCHIMENTO 16/07/2018 (manhã)			8º ENCHIMENTO 16/07/2018 (manhã)					
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)			
1 min	161	6,8	1 min	194	8			
2 min	55	7,85	2 min	11,3	3,8			
3 min	14,3	2,9	3 min	8,38	1,9			
4 min	7,15	1,6	4 min	7,1	0,85			
5 min	4,11	1	5 min	5,9	0,58			
10 min	2,39	2	10 min	6,58	1,8			
15 min	1,77	0,6	15 min	1,99	0,85			
20 min	1,34	0,41	20 min	1,5	0,51			
25 min	2,18	0,32	25 min	1,15	0,38			
30 min	0,79	0,25	30 min	0,97	0,34			
35 min	1,9	0,19	35 min	1,33	0,24			
40 min	2,15	0,15	40 min	1,59	0,14			
Volume bombeado (L)	28,5		Volume bombeado (L)	20				
Tempo de operação da bomba	53 s		Tempo de operação da bomba	10 s				

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 55: Resultados do Ensaio 16 do desaguamento na Instalação Piloto

ENSAIO 16								
1° ENCHIMENTO 03/08/2018 (manhã)			2° ENCHIMENTO 03/08/2018 (tarde)			3° ENCHIMENTO 03/08/2018 (tarde)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	89,1	16,5	1 min	79,5	8,2	1 min	90,9	7,9
2 min	15,6	18	2 min	22,9	16	2 min	19,7	4,8
3 min	11,5	20,5	3 min	8,94	4,9	3 min	7,16	2,6
4 min	7,18	17,8	4 min	7,05	2,5	4 min	6,49	1,8
5 min	11,2	19	5 min	6,45	1,4	5 min	5,35	1,2
10 min	27,4	61,4	10 min	4,74	2,9	10 min	4,57	3,3
15 min	3,02	4,4	15 min	1,6	0,79	15 min	3,67	2
20 min	2,42	2	20 min	1,07	0,45	20 min	2,45	0,76
25 min	1,52	1,6	25 min	0,74	0,37	25 min	1,91	0,44
30 min	1,1	0,6	30 min	0,82	0,31	30 min	1,79	0,34
35 min	0,98	0,64	35 min	0,9	0,32	35 min	2,02	0,25
40 min	0,95	0,46	40 min	1,84	0,28	40 min	1,58	0,2
Volume bombeado (L)	170		Volume bombeado (L)	39		Volume bombeado (L)	24	
Tempo de operação da bomba	7 min e 41 s		Tempo de operação da bomba	1 min e 32 s		Tempo de operação da bomba	44 s	
ENSAIO 16								
4° ENCHIMENTO 03/08/2018 (tarde)			5° ENCHIMENTO 03/08/2018 (noite)			6° ENCHIMENTO 03/08/2018 (noite)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	82,4	4,1	1 min	72,9	4,1	1 min	83,3	3
2 min	7,85	2,6	2 min	11,5	2,8	2 min	10,6	1,9
3 min	6,51	1,9	3 min	7,5	1,5	3 min	8,34	1,2
4 min	4,79	1,1	4 min	6,29	0,98	4 min	5,79	1
5 min	5,26	0,89	5 min	6,26	0,81	5 min	4,1	0,63
10 min	4,26	3	10 min	5,19	3	10 min	4,65	2,4
15 min	3,14	1,8	15 min	4,3	1,9	15 min	3,52	1,9
20 min	2,1	0,97	20 min	3,62	1,4	20 min	2,91	1,5
25 min	1,9	0,62	25 min	2,91	0,87	25 min	2,47	1,1
30 min	1,36	0,38	30 min	2,35	0,7	30 min	2,22	0,76
35 min	1,25	0,3	35 min	2,4	0,57	35 min	2,14	0,58
40 min	1,06	0,27	40 min	2,01	0,39	40 min	2,62	0,35
Volume bombeado (L)	17		Volume bombeado (L)	19,5		Volume bombeado (L)	15	
Tempo de operação da bomba	23 s		Tempo de operação da bomba	27 s		Tempo de operação da bomba	6 s	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 56: Resultados do Ensaio 17 do desaguamento na Instalação Piloto

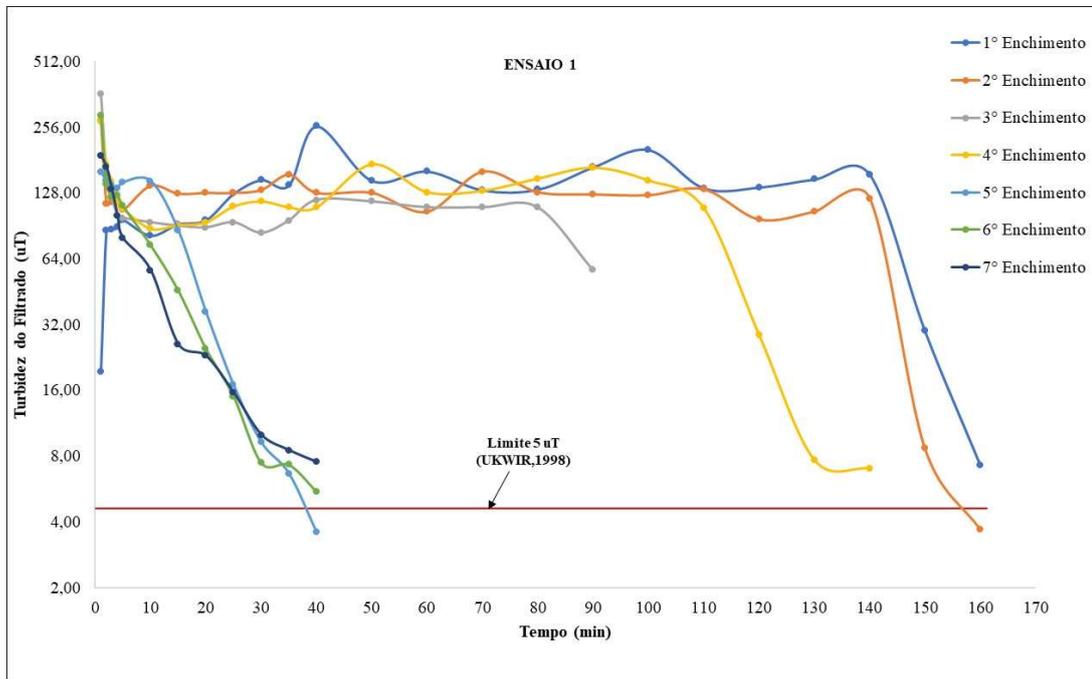
ENSAIO 17								
1° ENCHIMENTO 03/08/2018 (noite)			2° ENCHIMENTO 03/08/2018 (noite)			3° ENCHIMENTO 04/08/2018 (tarde)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	106	13,8	1 min	46,7	10	1 min	83	7
2 min	56,2	17	2 min	23,3	5,2	2 min	11,2	4,1
3 min	27,2	17	3 min	14,9	2,4	3 min	7,64	2,1
4 min	25,4	19	4 min	11,4	1,4	4 min	6,6	1,5
5 min	18,8	19,8	5 min	9,76	0,87	5 min	5,29	0,99
10 min	17,6	30,9	10 min	6,44	2,9	10 min	4,9	2,9
15 min	4,34	3	15 min	3,61	1,5	15 min	3,74	1,8
20 min	5,19	1,8	20 min	2,03	0,86	20 min	3,72	1,1
25 min	4,17	1,1	25 min	1,54	0,61	25 min	3,06	0,58
30 min	1,89	0,79	30 min	1,92	0,5	30 min	2,32	0,45
35 min	1,99	0,48	35 min	2,25	0,4	35 min	1,68	0,35
40 min	1,42	0,3	40 min	2,51	0,35	40 min	3,47	0,27
Volume bombeado (L)	133	47	Volume bombeado (L)	23,2	56,8	Volume bombeado (L)	23,1	16,9
Tempo de operação da bomba	5 min e 55 s		Tempo de operação da bomba	56 s		Tempo de operação da bomba	44 s	
ENSAIO 17								
4° ENCHIMENTO 04/08/2018 (tarde)			5° ENCHIMENTO 04/08/2018 (tarde)			6° ENCHIMENTO 04/08/2018 (tarde)		
Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)	Tempo	Turbidez	Volume Filtrado (L)
1 min	45,7	4,9	1 min	26,8	5	1 min	30,7	4,6
2 min	9,52	3,9	2 min	7,52	2,4	2 min	6,68	2,1
3 min	7,48	1,7	3 min	5,96	1,8	3 min	5,8	1,4
4 min	6,9	1,1	4 min	5,52	1	4 min	5,5	1
5 min	6,3	0,79	5 min	4,66	0,78	5 min	4,03	0,8
10 min	4,96	2,8	10 min	3,86	2,5	10 min	3,5	2,4
15 min	3,4	1,8	15 min	2,6	1,6	15 min	2,8	1,5
20 min	3,08	1,1	20 min	1,96	0,83	20 min	2	0,8
25 min	2,32	0,7	25 min	1,79	0,51	25 min	0,9	0,49
30 min	2	0,5	30 min	1,68	0,41	30 min	0,5	0,38
35 min	1,56	0,38	35 min	1,22	0,35	35 min	0,45	0,34
40 min	1,45	0,31	40 min	13,3	0,3	40 min	0,4	0,28
Volume bombeado (L)	18,2	1,8	Volume bombeado (L)	16,2	3,8	Volume bombeado (L)	14	6
Tempo de operação da bomba	23 s		Tempo de operação da bomba	17 s		Tempo de operação da bomba	14 s	

Fonte: Autor, 2019.

APÊNDICE C

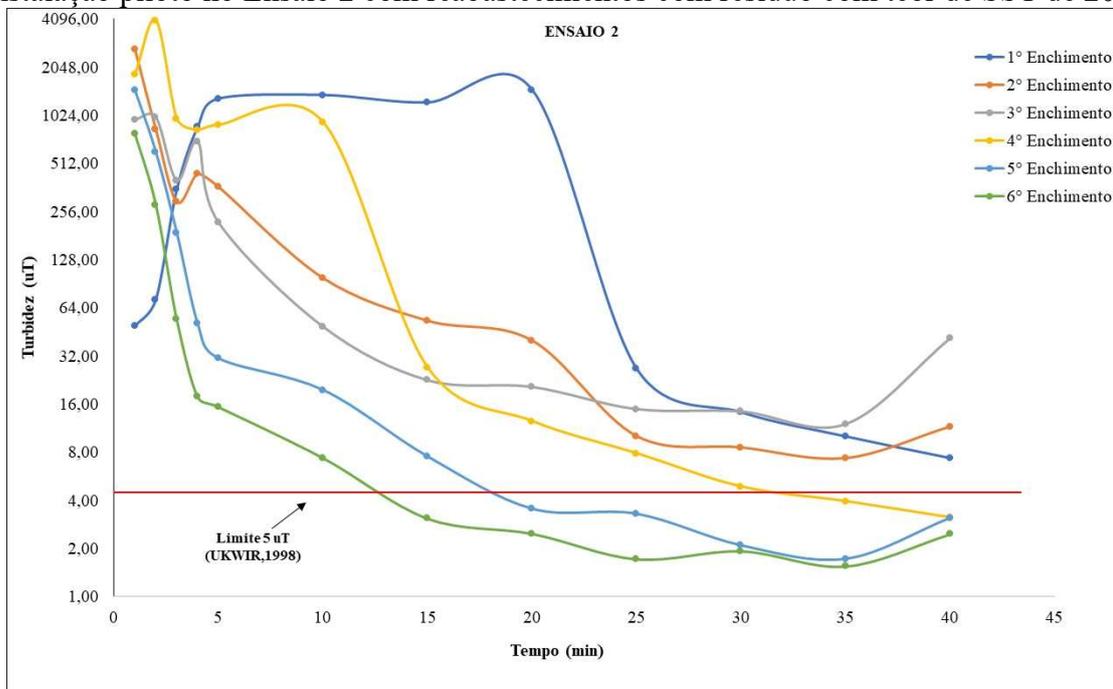
Resultado da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto

Figura 55: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 1 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 0,25 g/L



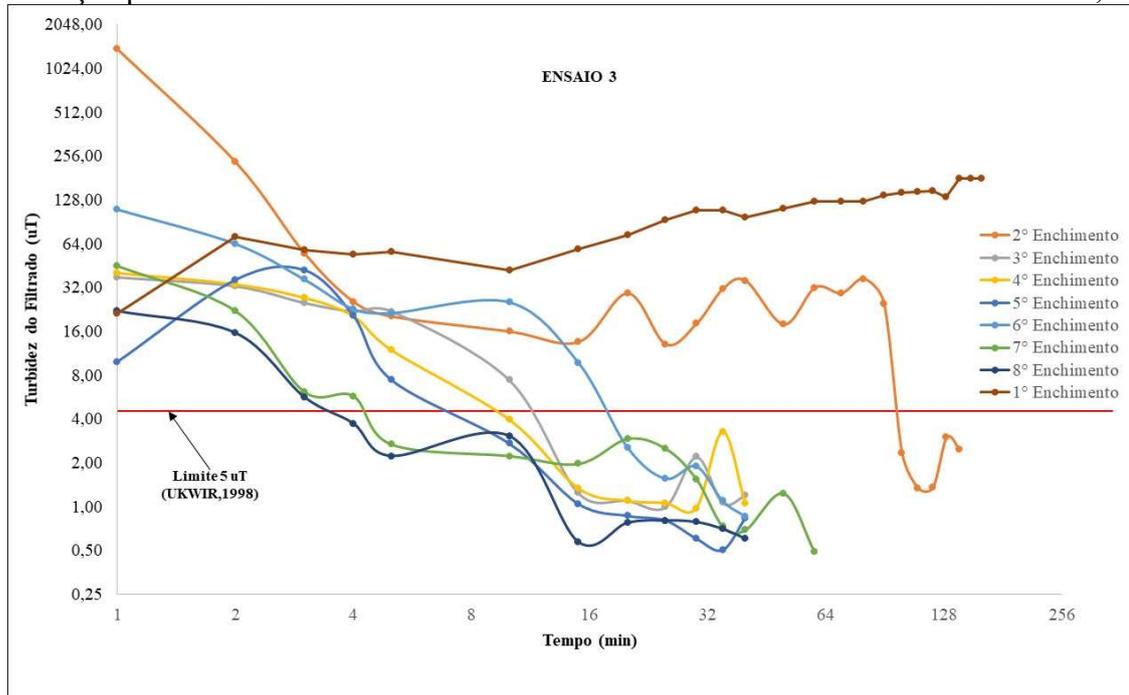
Fonte: Autor, 2019.

Figura 56: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 2 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 20 g/L



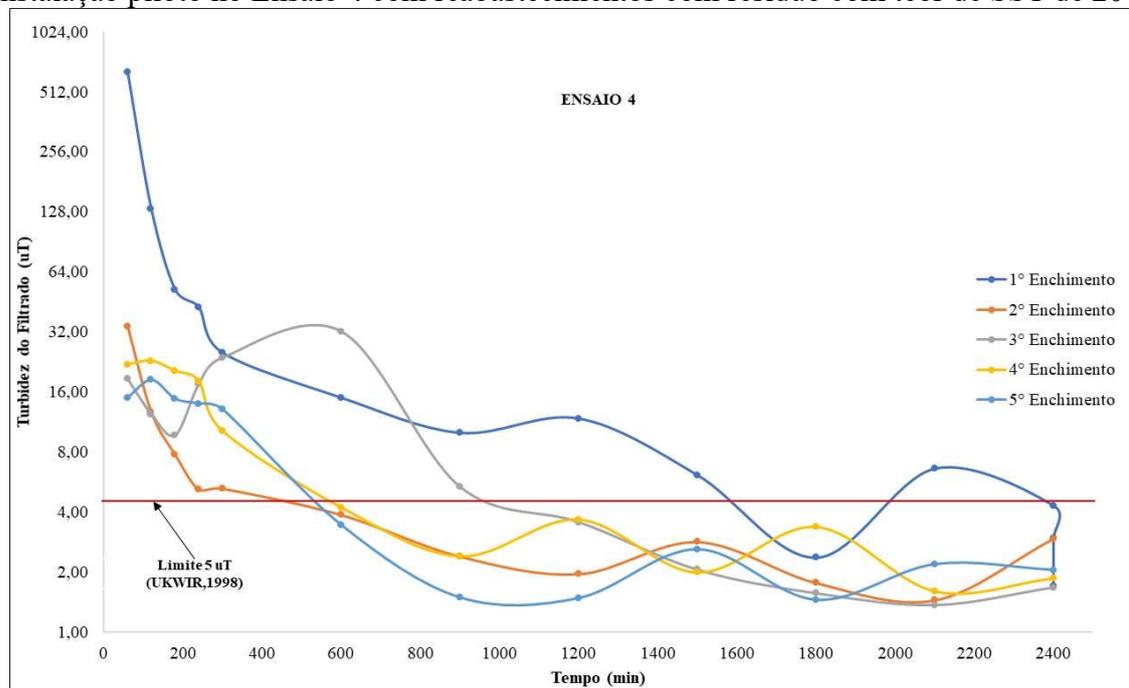
Fonte: Autor, 2019.

Figura 57: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 3 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 0,25 g/L



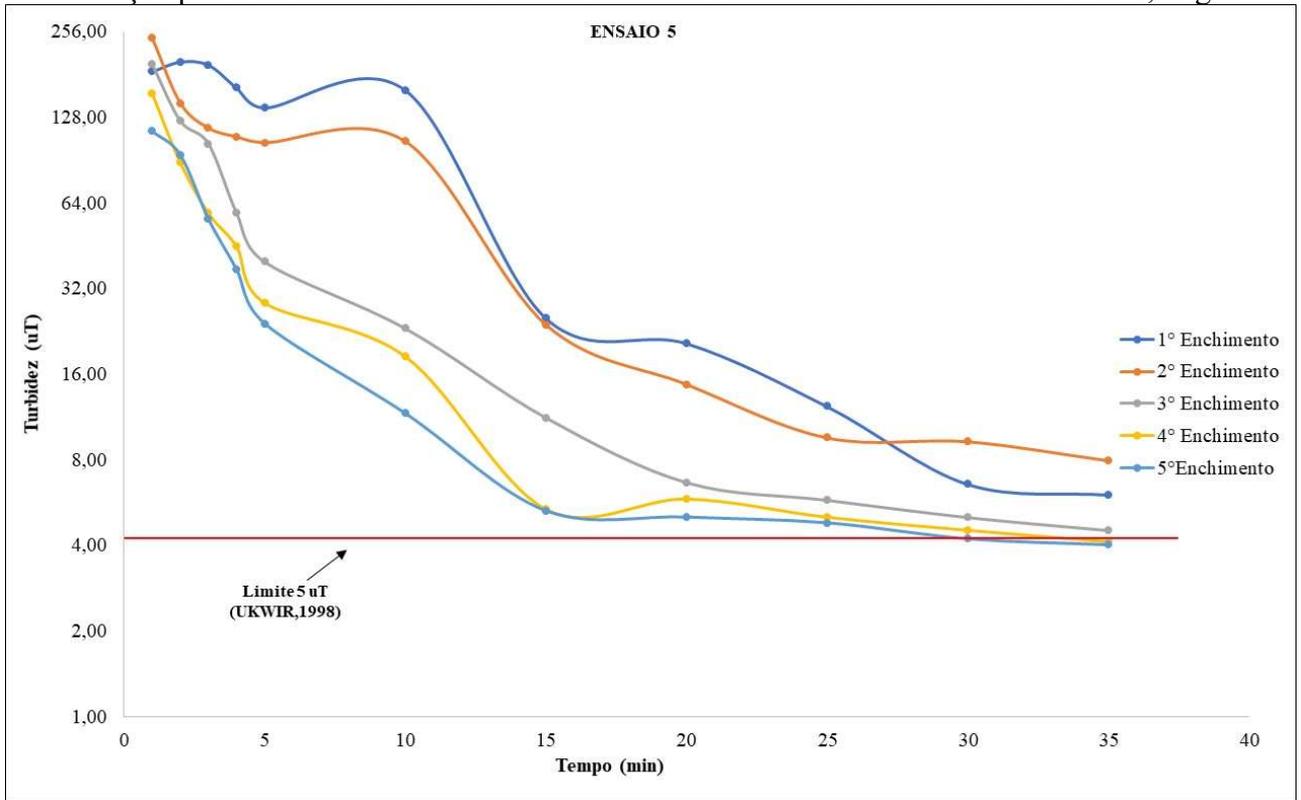
Fonte: Autor, 2019.

Figura 58: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 4 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 20 g/L



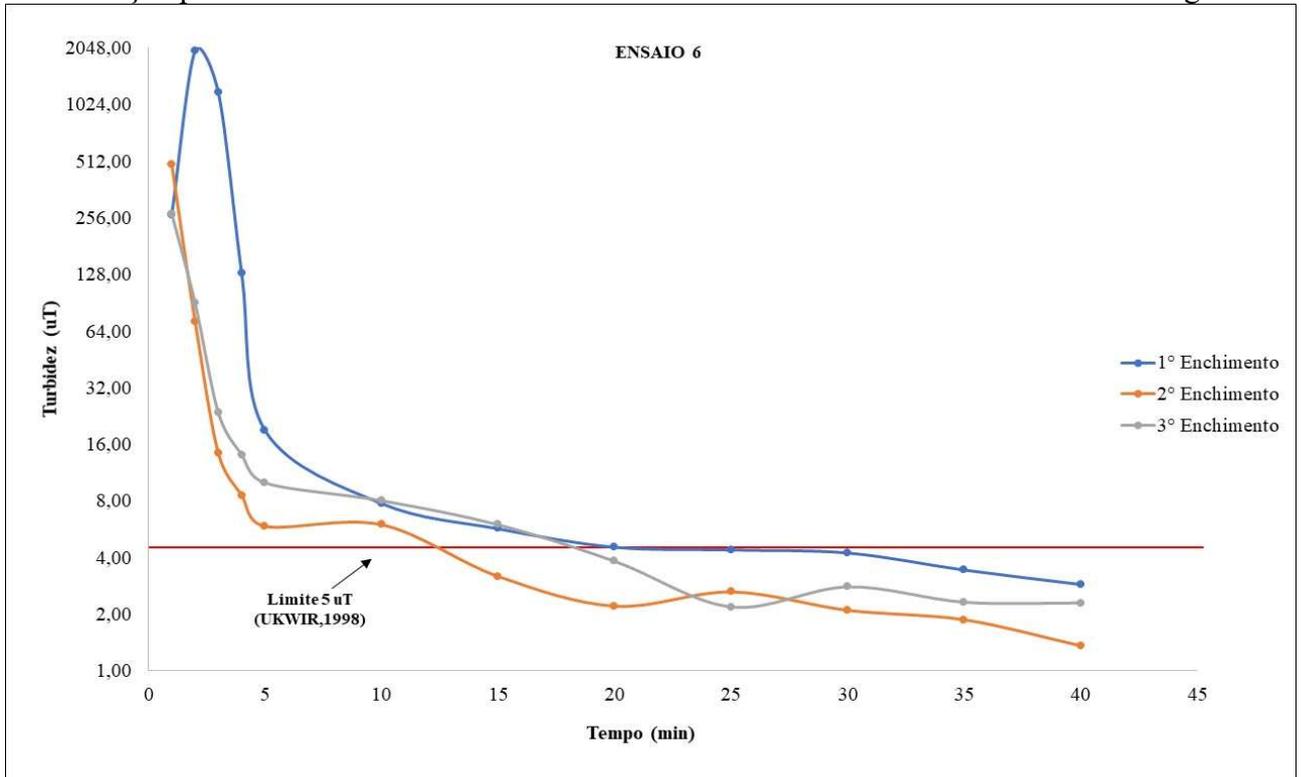
Fonte: Autor, 2019.

Figura 59: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 5 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 0,25 g/L



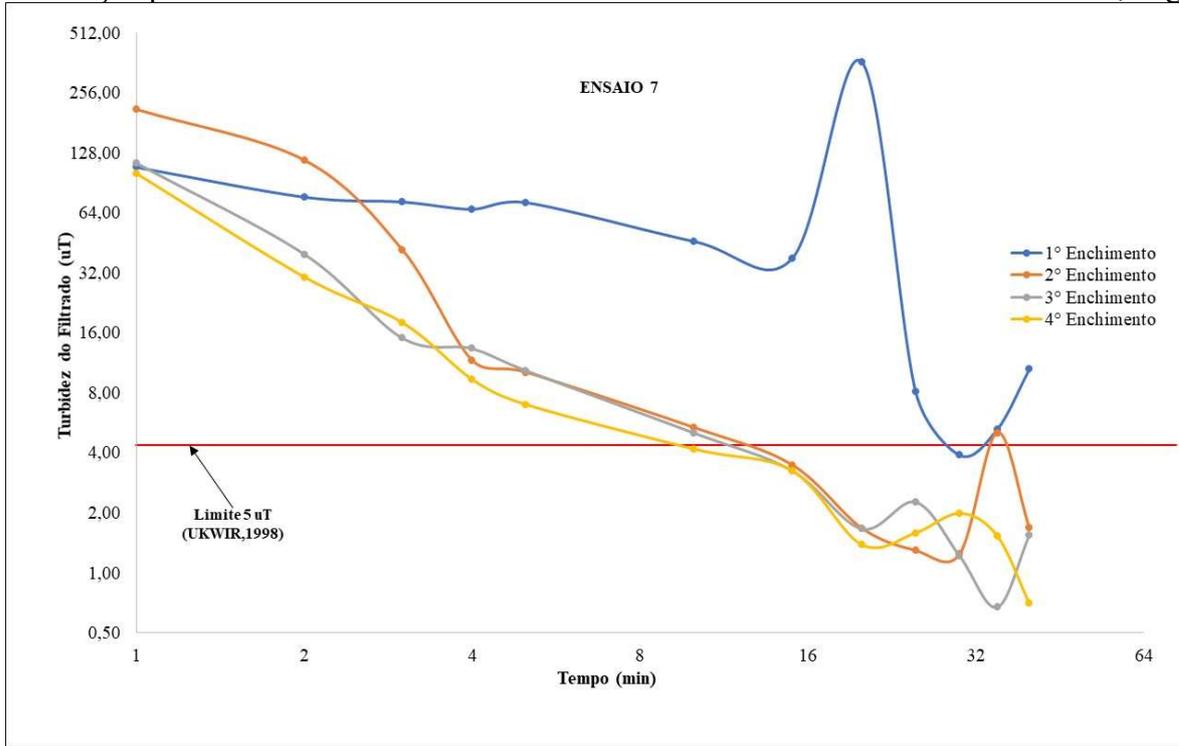
Fonte: Autor, 2019.

Figura 60: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 6 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 20 g/L



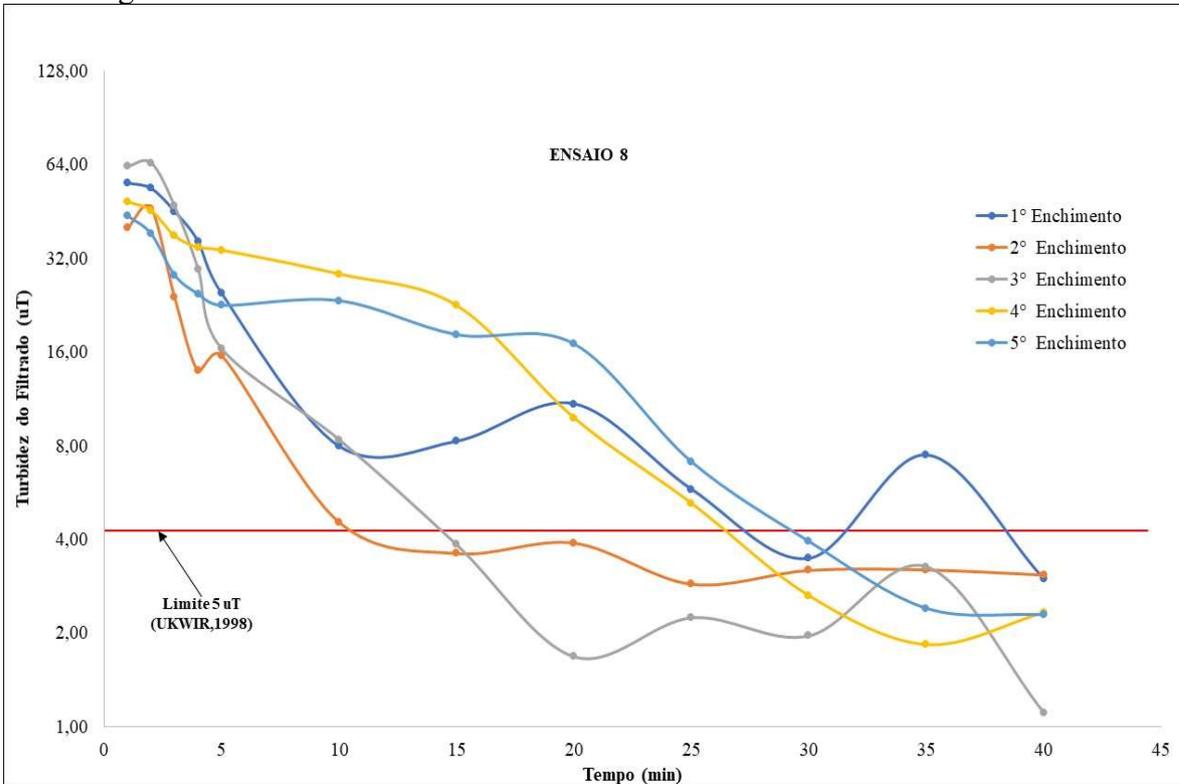
Fonte: Autor, 2019.

Figura 61: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 7 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 0,25 g/L



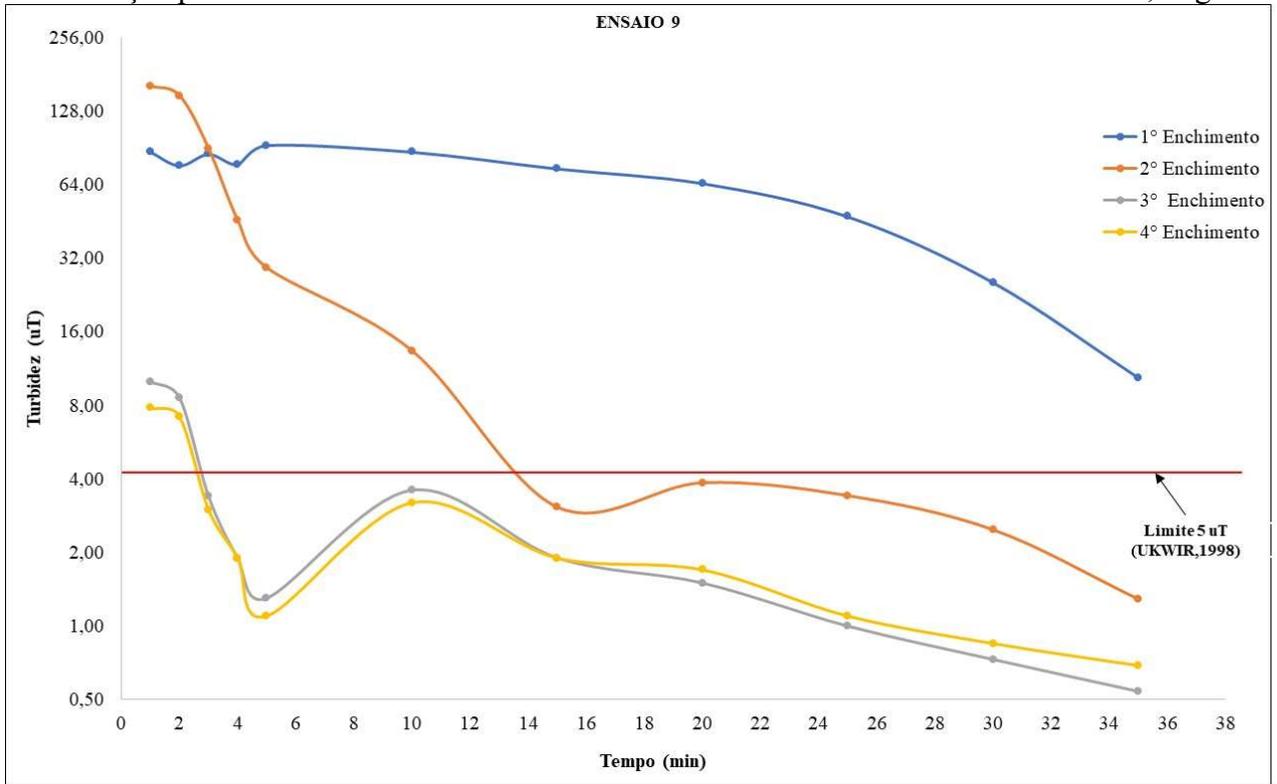
Fonte: Autor, 2019.

Figura 62: – Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 8 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 20 g/L



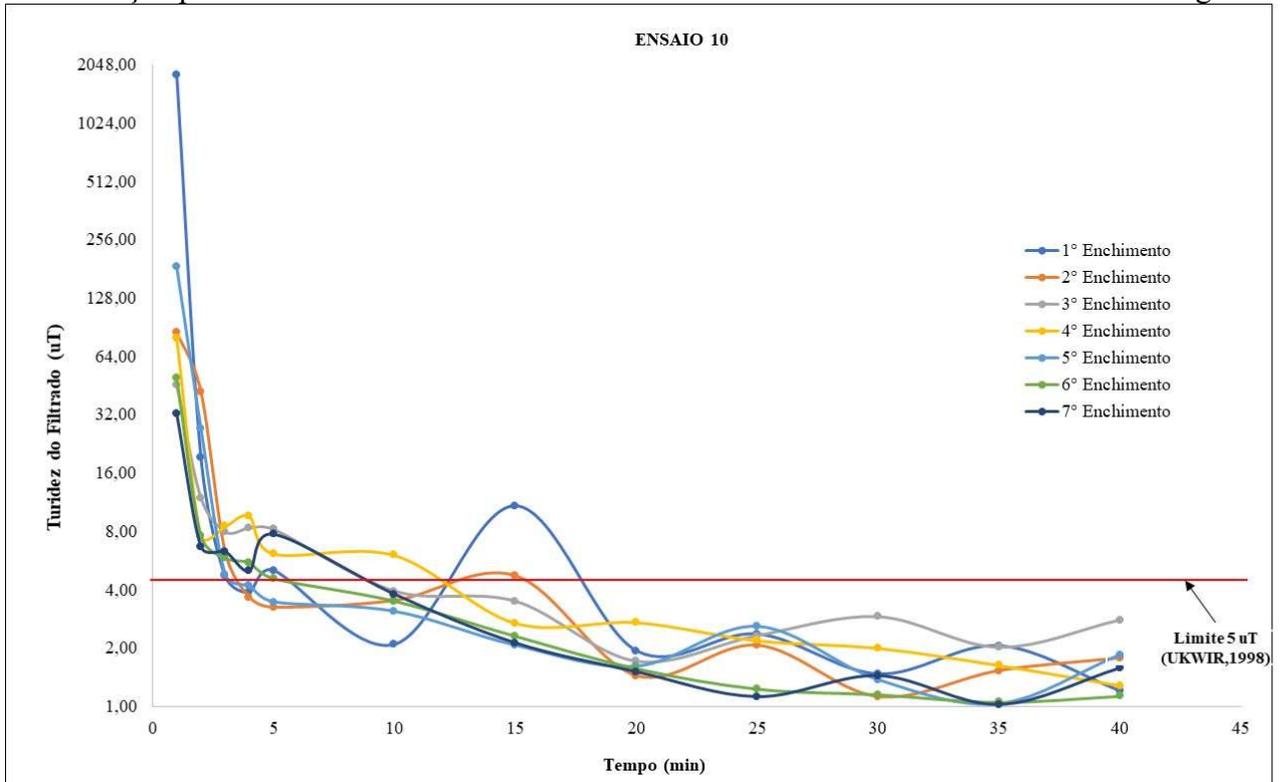
Fonte: Autor, 2019.

Figura 63: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 9 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 0,25 g/L



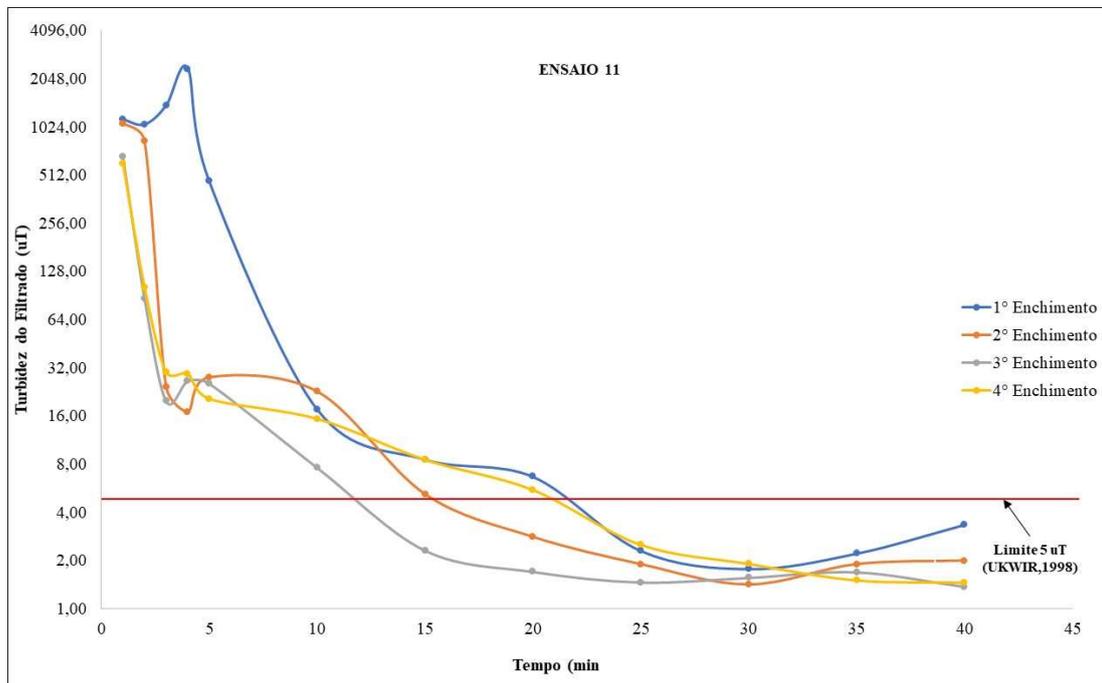
Fonte: Autor, 2019.

Figura 64: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 10 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 20 g/L



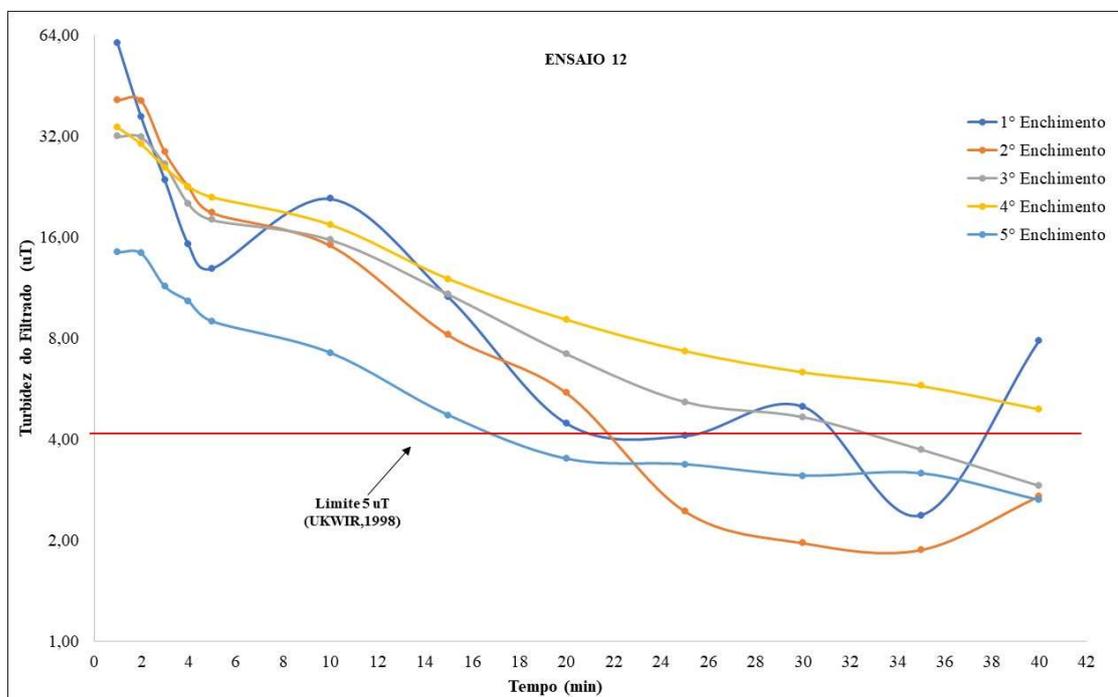
Fonte: Autor, 2019.

Figura 65: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 11 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 10,13 g/L



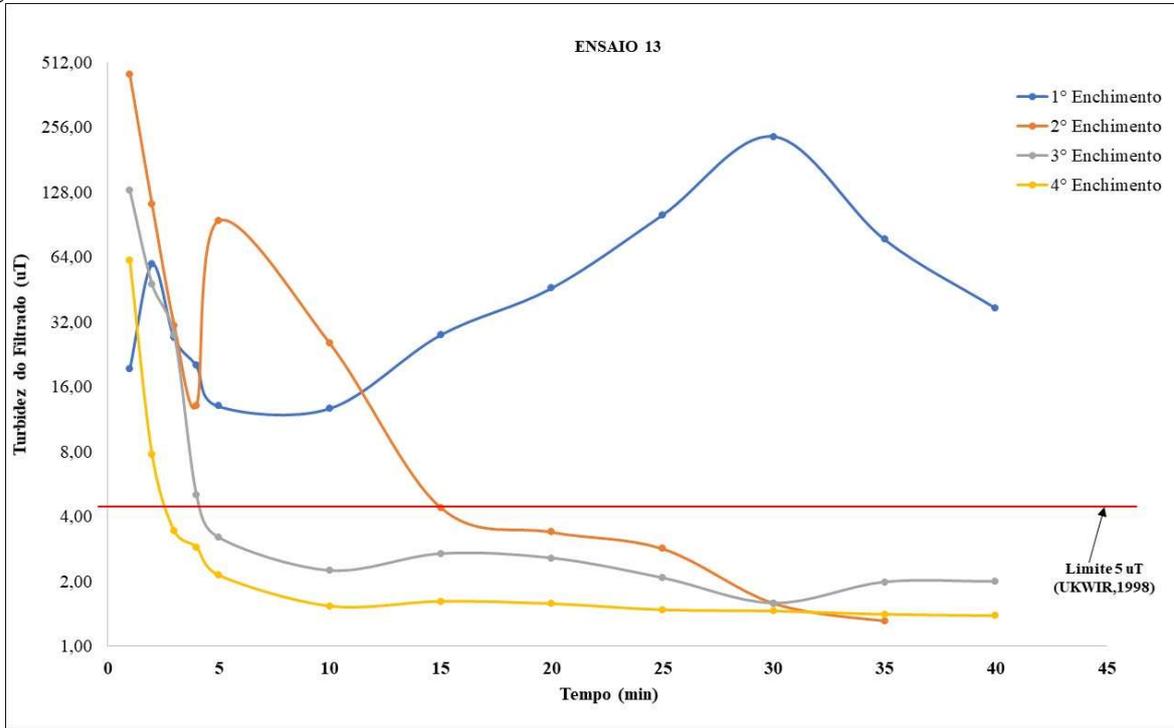
Fonte: Autor, 2019.

Figura 66: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 12 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 10,13 g/L



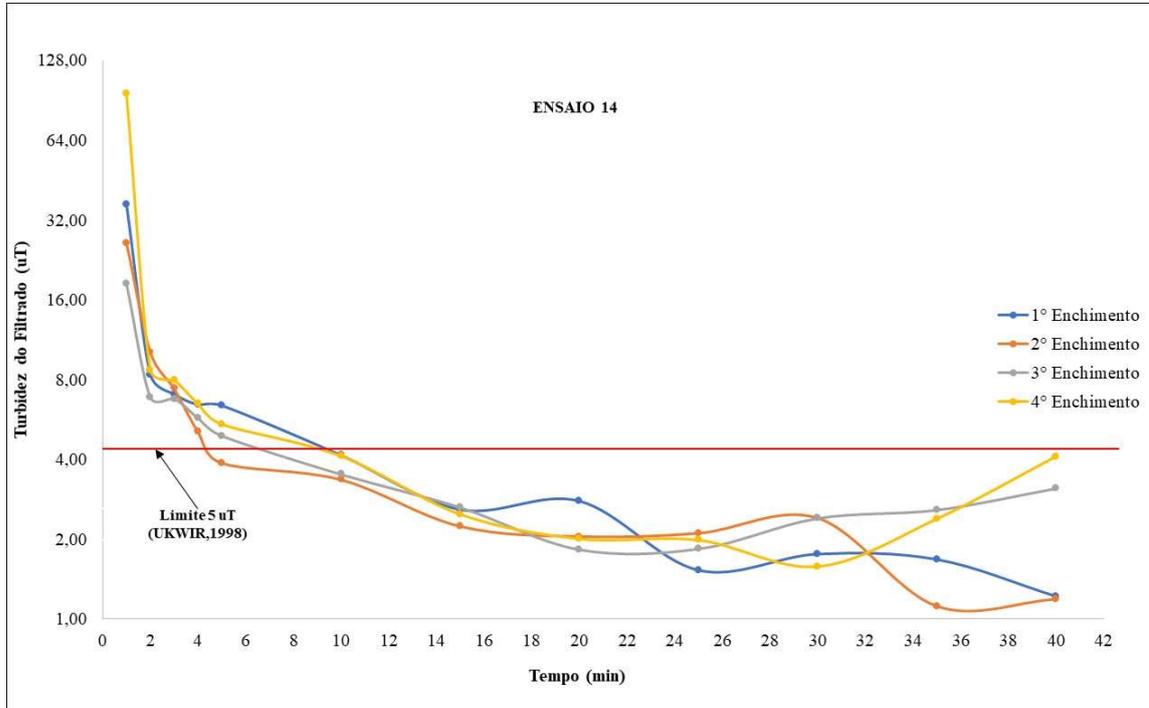
Fonte: Autor, 2019.

Figura 67: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 13 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 10,13 g/L



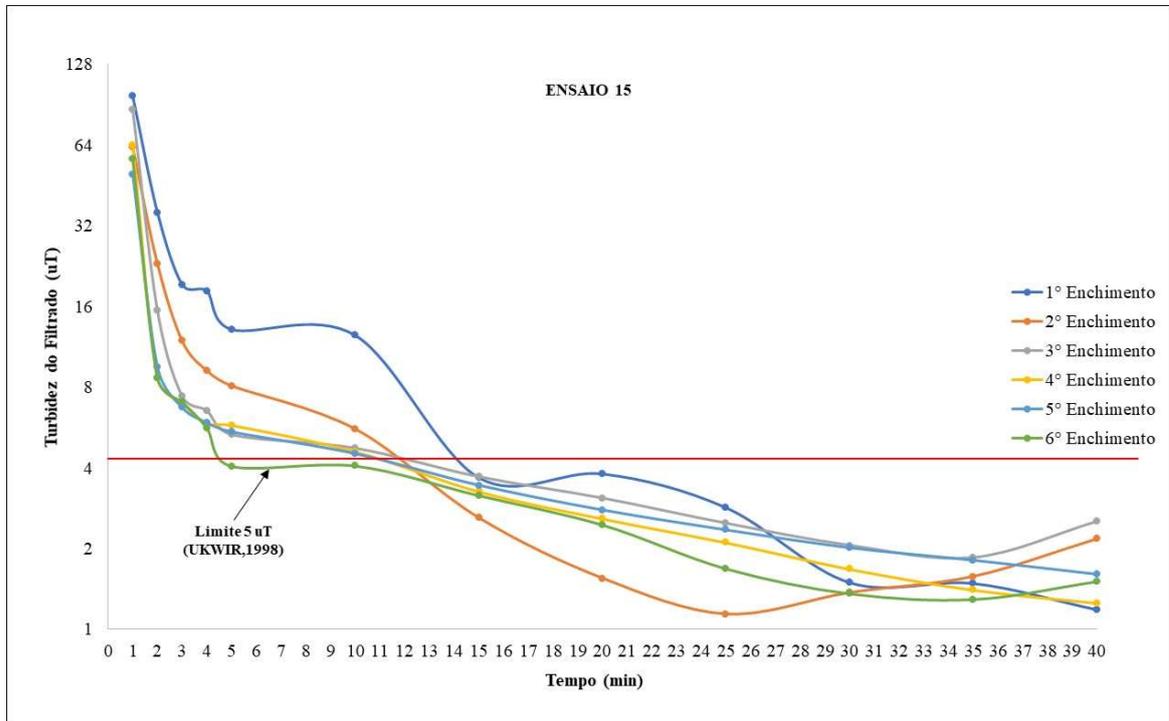
Fonte: Autor, 2019.

Figura 68: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 14 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 10,13 g/L



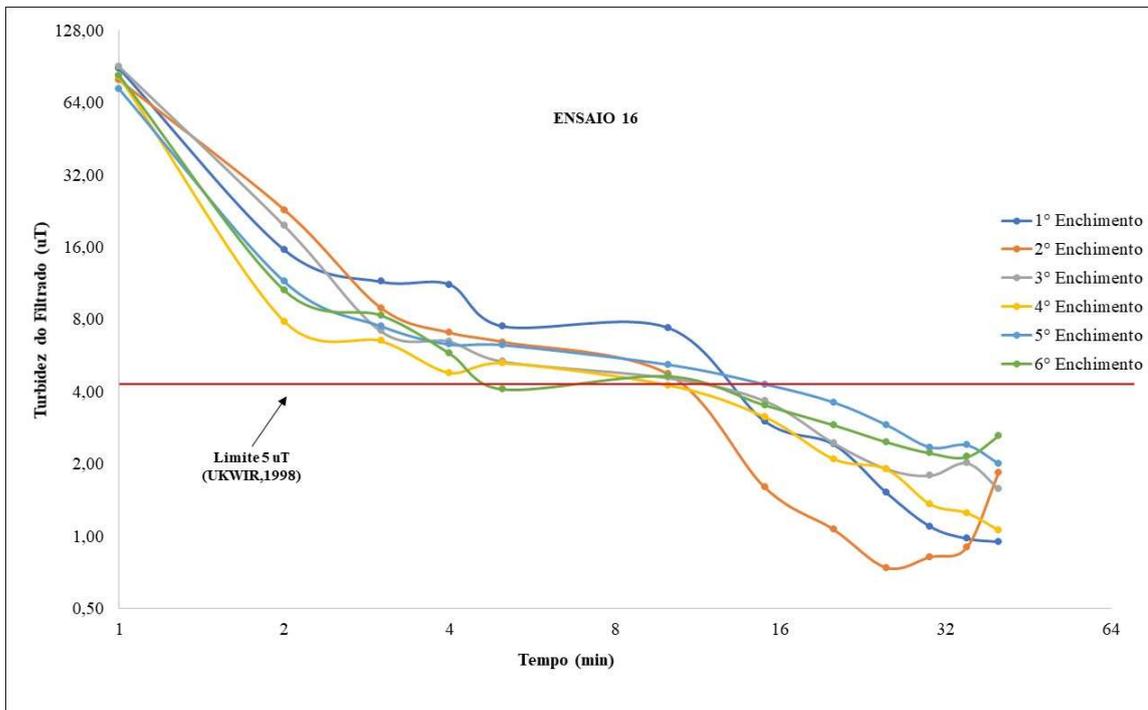
Fonte: Autor, 2019.

Figura 69: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 15 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 10,13 g/L



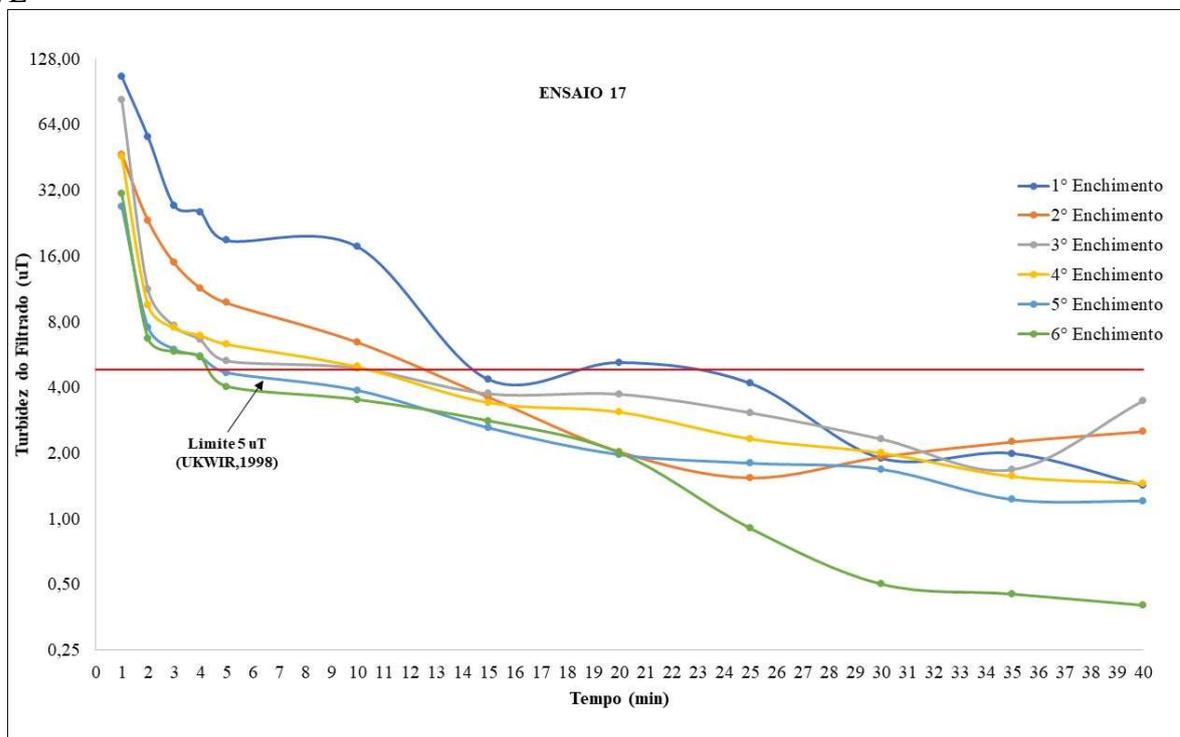
Fonte: Autor, 2019.

Figura 70: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 16 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 10,13 g/L



Fonte: Autor, 2019.

Figura 71: Resultados da variação da turbidez do filtrado em função do tempo de desaguamento na instalação piloto no Ensaio 17 com reabastecimentos com resíduo com teor de SST de 10,13 g/L



Fonte: Autor, 2019.

ANEXO A**Informações Técnicas do Geotêxtil A e B**

Informações Técnicas do Geotêxtil A:

HUESKER

HUESKER Synthetic GmbH
 Fabrikstraße 13-15 · D-48712 Gescher
 Postfach 1262 · D-48705 Gescher
 Telefon +49 (0) 25 42/7 01-0
 Telefax +49 (0) 25 42/7 01-499
 Internet: <http://www.huesker.com>
 E-mail: info@huesker.de



HaTe® PP 105/105 DW

DATA SHEET

Woven PP - Fabric
 for dewatering applications



PRODUCT DATA:

Raw Material	PP	S E P A R A T I O N
Weight <i>EN ISO 9864</i>	~ 445 g/m ²	
Ultimate tensile strength <i>EN ISO 10.319</i>		
longitudinal	≥ 105 kN/m	
transversal	≥ 105 kN/m	
Strain at nominal tensile strength <i>EN ISO 10.319</i>		
longitudinal	< 9 %	
Transversal	< 9 %	
Opening size <i>EN ISO 12956</i>	200 µm	
(Tolerance)	±50 µm)	
Water permeability index normal to the plane	25 x 10 ⁻³ m/s	
(Tolerance <i>(EN ISO 11.058)</i>)	5 x 10 ⁻³ m/s)	
Standard dimensions		
Width	5.20 m	
Length	200.00 m	

No responsibility is accepted for any change in product properties due to environmental influences and / or improper application or handling. Rights are reserved to modify the product to effect improvements.

HaTe® woven Datasheet, 05/2011 Rev. B

Informações Técnicas do Geotêxtil B:



Product Description

1. Product Name	SoilTain® PP 105/105 HDW		
2. Product Description	High performance filter fabric for dewatering systems		
3. Raw Materials used			
Raw Material:	Fabric	PP	

Technical data

01. Mass per unit area (DIN EN ISO 9864)		g/m ²	≈ 440
02. Nominal Tensile Strength (DIN EN ISO 10319)	MD CMD	kN/m kN/m	≥ 105 ≥ 105
03. Strain at Nominal Tensile Strength (DIN EN ISO 10319)	MD CMD	% %	≤ 10 ≤ 10
04. Water Permeability Coefficient (EN ISO 11058)		m/s	≈ 55 x 10 ⁻³
05. Characteristic Opening Size O₉₀ (EN ISO 12956)		µm	≈ 400
06. Weathering resistance (EN ISO 12224)		kN/m	≥ 90
07. Standard Roll Dimensions (width x length)		m x m	5,20 x 200

HUESKER Synthetic GmbH
 Fabrikstraße 13-15, D-48712 Gescher
 Tel.: +49 (0) 25 42 / 701 - 0
 Fax: +49 (0) 25 42 / 701 - 499
 E-Mail: export@HUESKER.de
 Internet: www.HUESKER.com
 SoilTain® is a registered trademark by HUESKER Synthetic GmbH



No responsibility is accepted for any change in product properties due to environmental influences and / or improper application or handling. Rights are reserved to modify the product to effect improvements.

Issue: 06/2015 Rev. A

ANEXO B

Informações Técnicas do Polímero Sintético Catiônico, Aniônico e Não Aniônico

Informações Técnicas do Polímero Sintético Não Aniônico:



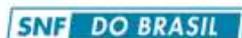
Arquivo de Dados Tecnicos

SNF do Brasil Ltda. - Estrada Bonsucesso-Itaquaquecetuba, nº 80 - V Maria de Lourdes Guarulhos SP 07251-280 - Brasil
 telefone: +55 11 2303-4290 e-mail: info@snfbrasil.com

FLONEX 920 SHR

<i>Estado físico:</i>	Sólido granulado
<i>Cor:</i>	Branco
<i>Caráter iônico:</i>	Não iônico
<i>Peso molecular:</i>	Muito alto
<i>O tamanho das partículas:</i>	> 2 mm : 2 % < 0.15 mm : 6 %
<i>Densidade da massa:</i>	0.74
<i>Viscosidade Brookfield† (cps):</i>	@ 5.0 g/L : 15 @ 2.5 g/L : 5 @ 1.0 g/L : 1
<i>pH:</i>	5 - 7 @ 5 g/l
<i>Concentração de trabalho recomendada (g/l):</i>	5
<i>Concentração máxima (g/l):</i>	15
<i>Tempo de dissolução (mn) em água desmineralizada @ 5 g/l, 25 °C:</i>	180
<i>Estabilidade da solução em água desmineralizada (dias):</i>	1
<i>Temperatura de armazenagem (°C):</i>	0 - 35
<i>Tempo de vida (meses)*:</i>	24
† Valores médios de referência. Selecionar os aparelhos de dissolução na base de uma viscosidade 10 vezes mais baixa. * Quando armazenado dentro de um edifício em uma temperatura estavel entre 5° e 30°C.	
<u>Tamanhos de embalagem</u>	
<i>Sacos plásticos</i>	25 kg
<i>Big Bags</i>	750 kg
<i>Outras medidas</i>	Conforme pedido

Informações Técnicas do Polímero Sintético Aniônico:



Arquivo de Dados Técnicos

SNF do Brasil Ltda. - Bonsucesso-Itaquaquecetuba Road, nº 80 - V Maria de Lourdes Guarulhos SP 07251-280 - Brasil
phone: +55 11 2303-4290 e-mail: info@snfbr.com

FLONEX 923 SH

<i>Estado físico:</i>	<i>Sólido granulado</i>
<i>Cor:</i>	<i>Branco</i>
<i>Caracter iônico:</i>	<i>Aniônico</i>
<i>Densidade de carga:</i>	<i>Médio</i>
<i>Peso molecular:</i>	<i>Alto Muito alto</i>
<i>Tamanho da malha (%>10 malha) :</i>	<i>2</i>
<i>Tamanho da malha (% < 100 malha):</i>	<i>6</i>
<i>Densidade da massa:</i>	<i>0.79</i>
<i>Viscosidade Brookfield (cps)**:</i>	
<i>@ 5.0 g/l :</i>	<i>500</i>
<i>@2.5 g/l :</i>	<i>230</i>
<i>@ 1.0 g/l :</i>	<i>80</i>
<i>pH:</i>	<i>7.0 ± 1.0</i>
<i>Concentração de trabalho recomendada (g/l) :</i>	<i>3</i>
<i>Concentração máxima (g/l) :</i>	<i>5</i>
<i>Tempo de dissolução (mn) em água desmineralizada @ 5 g/l, 25 °C :</i>	<i>120</i>
<i>Estabilidade da solução em água desmineralizada (dias) :</i>	<i>1</i>
<i>Temperatura de armazenagem (°C):</i>	<i>0 - 35</i>
<i>Tempo de vida (meses)*:</i>	<i>24</i>

** Valores médios dados. Selecionar os aparelhos de dissolução na base de uma viscosidade 10 vezes mais baixa.
* Quando armazenado dentro de um edifício em uma temperatura estável entre 5° e 30°C.

Tamanhos de embalagem

<i>Sacos plásticos</i>	<i>25 kg</i>
<i>Big Bags</i>	<i>750 kg</i>
<i>Outras medidas</i>	<i>Conforme pedido</i>

Informações Técnicas do Polímero Sintético Catiônico:



Arquivo de Dados Tecnicos

SNF do Brasil Ltda., Estrada Bonsucesso-Itaquaquecetuba, nº 80, V Maria de Lourdes, Guarulhos - SP, 07251-280, República Feder:
telefone: +55 11 2303-4290, e-mail: info@snfbrasil.com

FLONEX 4350 SH

<i>Estado físico:</i>	Sólido granulado
<i>Cor:</i>	Branco
<i>Caracter iônico:</i>	Catiônico
<i>pH:</i>	2.5 - 4.5 @ solução aquosa a 5%
<i>Temperatura de armazenagem (°C):</i>	0 -35
<i>Tempo de vida (meses)*:</i>	12
* Quando armazenado dentro de um edifício em uma temperatura estavel entre 5° e 30°C.	
<u>Tamanhos de embalagem</u>	
<i>Sacos plasticos</i>	25 kg
<i>Big Bags</i>	500 & 750 kg
<i>Outras medidas</i>	Conforme pedido