

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA E DO DESAGUAMENTO DE
LODO DE ETA EM LEITO DE DRENAGEM UTILIZANDO
DIFERENTES GEOTÊXTEIS E APLICAÇÃO DE POLÍMERO**

ISABELA GAGLIARDI ORTIZ

São Carlos
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA E DO DESAGUAMENTO DE
LODO DE ETA EM LEITO DE DRENAGEM UTILIZANDO
DIFERENTES GEOTÊXTEIS E APLICAÇÃO DE POLÍMERO**

ISABELA GAGLIARDI ORTIZ

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Erich Kellner

Coorientação: Profa. Dra. Cali Laguna Achon

São Carlos

2022

Gagliardi Ortiz, Isabela

Avaliação da eficiência e do desaguamento de lodo de ETA em leito de drenagem utilizando diferentes geotêxteis e aplicação de polímero / Isabela Gagliardi Ortiz -- 2022.
255f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Erich Kellner

Banca Examinadora: Dione Mari Morita, Angela Di Bernardo Dantas, Jorge Akutsu, Rodrigo Eduardo Cordoba

Bibliografia

1. Lodo de ETA. 2. Desaguamento. 3. Polímeros. I. Gagliardi Ortiz, Isabela. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Isabela Gagliardi Ortiz, realizada em 02/09/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Erich Kellner (UFSCar)

Prof. Dr. Dione Mari Morita (USP)

Prof. Dr. Angela Di Bernardo Dantas (USP)

Prof. Dr. Jorge Akutsu (UFSCar)

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Cordoba (UFSCar)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

DEDICATÓRIA

As minhas duas estrelas no céu, meu pai Paulo Ortiz e meu avô Luiz Gagliardi, exemplos de caráter e bondade (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Quando iniciei o Doutorado, realmente buscava aprender mais, claro, o que de fato aconteceu, como tudo que se propõe a fazer, dediquei-me.

Mas, o que realmente não esperava foram as “minhas perdas” nessa longa trajetória. Antes da pandemia, perdi meu pai Paulo, meu maior exemplo, aquele “cara” que me incentivava para tudo e guardava sempre um sorriso no rosto em qualquer situação e para a COVID-19, perdi meu avô Luiz, com 91 anos, retrato de trabalho e força. Bom, foram tantas marcas e acontecimentos...

Hoje, sinto que o que realmente não me faltou foi força de vontade e perseverança para que eu conseguisse alcançar meus objetivos. Sei, que onde meus dois amores estão, foram me dando forças e aqui estou.

Não poderia deixar de agradecer a Deus que me deu sabedoria e iluminou meu caminho em todos os momentos da Pesquisa. A minha família, hoje, formada só por mulheres, minha mãe Helena e minha querida filha Pietra que em toda ocasião me botavam para frente quando eu desanimava. A minha vó Helena, sempre, sempre me ajudando em tudo! Ao meu namorado, André, por todas as palavras de carinho e positividade, dizendo-me: vai dar certo!

Ao meu orientador, Professor Erich, pelos ensinamentos, conversas, reuniões e pela facilidade e leveza em transmitir o seu conhecimento. A minha coorientadora, Professora Cali, que foi pronta em ajudar.

Aos inúmeros professores que tive contato, desde o Mestrado até o Doutorado da Pós - Graduação em Engenharia Urbana (PPGEU) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Ao ex - secretário do Programa, Alex, uma pessoa admirável de todas as formas.

As empresas OBER e HUESKER que doaram os geotêxteis e a empresa KEMIRA que doou os polímeros utilizados. Ao SAAE de São Carlos que forneceram o lodo e a água do decantador.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 pelo apoio no presente trabalho e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro da infraestrutura para realização dos ensaios nesta pesquisa, Projeto Universal 01/2016 Faixa A, Processo N° 424639/2016-5.

Enfim, a todos que me ajudaram até aqui, o meu muito obrigada por tudo!

Uma frase que exemplifica tudo: *“Você não pode mudar o vento, mas pode ajustar as velas do barco para chegar onde quer”*. (Confúcio).

Resumo

Ao longo das etapas envolvidas no processo de tratamento da água ocorre a formação de lodo, o qual é caracterizado como resíduo sólido e, portanto sua destinação deve ser compatível com as diretrizes da PNRS – Lei 12.305/2010, priorizando a redução, reuso e reciclagem. Nesse sentido o desaguamento, compreendido como um método de diminuição do volume de lodo atende ao estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos. O desaguamento é caracterizado pela remoção da água livre, sobrenadante encontrada nos interstícios dos sólidos, utilizando sistemas naturais ou mecânicos. Os leitos de drenagem, designados como LD e anteriormente conceituados como leitos de secagem estão entre estes sistemas naturais. Essa técnica tem se mostrado interessante, não obstante percebe-se a ausência de pesquisas utilizando polímeros como condicionante. Vários autores defendem a teoria de que o lodo de ETA não necessita de polímero para ser desaguado, pois já possui condicionantes químicos, introduzidos no processo de tratamento da água, que facilitaríamos o desaguamento. Assim, o objetivo principal desta pesquisa foi estudar a aplicação de polímeros, como condicionante nos lodos de ETA aplicados nos LD, com vistas a melhora da eficiência e do desaguamento. Para tanto, foi utilizado um sistema de Leitos de Drenagem em escala de bancada, sendo realizado ao todo 108 drenagens, dentre ensaios sem polímero (SP) e com polímero (CP), com 4 geossintéticos (3 geotêxteis não-tecidos e um geotêxtil tecido), um teor de sólidos totais (ST) fixo do lodo de 2% e 3 alturas de camada de lodo (H10, H30 e H50 cm). Posteriormente, para a escolha do polímero a ser aplicado nos LDs, foram realizados ensaios de cone com diferentes tipos de polímeros, concentrações e dosagens, com os respectivos geotêxteis. Esses resultados foram aplicados ao sistema de LD, caracterizados como CP-cone para cada geotêxtil ensaiado. Com o intuito de estudar um outro método de seleção de polímeros, foi utilizado o próprio sistema de LD, já que a TAS (Taxa de aplicação de sólidos) dentre esses dois métodos foram consideradas diferentes. Assim, foram realizados ensaios, caracterizados como CP-alternativo, utilizando os mesmos geotêxteis. A análise dos resultados destacou que os ensaios CP - alternativo conseguiram aumentar as taxas de remoção, principalmente para cargas hidráulicas maiores, com $TAS > 6 \text{ kg/m}^2$, com qualidade dos drenados superiores para todas as cargas hidráulicas; o método alternativo seria o mais indicado pois apresentou alta remoção com qualidade satisfatória. Somente o geotêxtil não – tecido GTNT600 não apresentou diferença estatística na M_R seca independente da carga hidráulica e o método aplicado para seleção de polímeros. Em relação as eficiências, a EF (%) foi $> 98\%$ para os ensaios CP. Para a E_{SST} (%) os valores foram $> 96\%$. Maiores cargas hidráulicas obtiveram maiores eficiências de remoção de SST, independente da configuração do ensaio (SP e CP – cone e alternativo) com valores acima de 98%.

Palavras-chave: resíduo sólido; lodo de ETA; desaguamento; eficiência; geotêxtil; leito de drenagem; polímeros; qualidade.

Abstract

During the stages involved in the water treatment process, sludge is formed, which is characterized as solid waste and, therefore, its destination must be compatible with the guidelines of the PNRS - Law 12.305/2010, prioritizing reduction, reuse and recycling. In this sense, dewatering, understood as a method of reducing the volume of sludge, meets the requirements established by the National Policy on Solid Waste. Dewatering is characterized by the removal of free water, supernatant found in the interstices of solids, using natural or mechanical systems. Drainage beds, designated as DB and previously conceptualized as drying beds, are among these natural systems. This technique has shown to be interesting, despite the lack of research using polymers as conditioning. Several authors defend the theory that the WTP sludge does not need a polymer to be dewatered, as it already has chemical conditioners, introduced in the water treatment process, which would facilitate dewatering. Thus, the main objective of this research was to study the application of polymers as a conditioner in the WTP sludge applied to the DB, with a view to improving efficiency and dewatering. For this purpose, a bench scale Drainage Bed system was used, with a total of 108 drainages, including tests without polymer (SP) and with polymer (CP), with 4 geosynthetics (3 non-woven geotextiles and a woven geotextile), a fixed total solids (ST) content of the sludge of 2% and 3 sludge layer heights (H10, H30 and H50 cm). Subsequently, in order to choose the polymer to be applied to the DBs, cone tests were carried out with different types of polymers, concentrations and dosages, with the respective geotextiles. These results were applied to the BD system, characterized as CP-cone for each geotextile tested. In order to study another polymer selection method, the BD system itself was used, since the TAS (Solid Application Rate) between these two methods were considered different. Thus, tests were performed, characterized as CP-alternative, using the same geotextiles. The analysis of the results highlighted that the CP - alternative tests were able to increase the removal rates, mainly for higher hydraulic loads, with $TAS > 6 \text{ kg/m}^2$, with superior quality of drains for all hydraulic loads; the alternative method would be the most indicated because it presented high removal with satisfactory quality. Only the non-woven geotextile GTNT600 showed no statistical difference in dry retained mass regardless of the hydraulic load and the method applied for polymer selection. Regarding the efficiencies, the EF (%) was $> 98\%$ for the CP tests. For the EsST (%) the values were $> 96\%$. Higher hydraulic loads obtained higher TSS removal efficiencies, regardless of the test configuration (SP and CP – cone and alternative) with values above 98%.

Keywords: solid waste; WTP sludge; dewatering; efficiency; geotextile; drainage bed; polymers; quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de uma ETA convencional e locais de geração de resíduos.....	28
Figura 2 - Ilustração das frações de água constituintes dos lodos de ETAs.....	33
Figura 3 - Evolução da sedimentação do tipo sazonal.....	34
Figura 4 - Evolução dos leitos de secagem.....	39
Figura 5 - Curvas de remoção de água filtrada de sistemas, modificado por Cordeiro 1993 e remodelado em 2000.....	40
Figura 6 - Fases do desaguamento de lodo de ETA em Leito de Drenagem, segundo Barroso (2007).....	43
Figura 7 - Mecanismo simplificado de Coagulação.....	45
Figura 8 - Demonstração do Floculante adsorvido de forma plana nas partículas.....	45
Figura 9 - Demonstração de Floculação por pontes poliméricas.....	46
Figura 10 - Relação de ST e dosagem de polímero no filtrado.....	55
Figura 11 - Geossintéticos para drenagem e filtração.....	61
Figura 12 - Tecedura dos geotêxteis utilizados: a) geotêxtil tecido e b) geotêxtil não- tecido.....	63
Figura 13 - Filtro graduado desenvolvido dentro do solo adjacente ao geotêxtil.....	64
Figura 14 - Arcos de solo sobre os poros do geotêxtil.....	64
Figura 15 - Colmatação em filtros geotêxteis.....	74
Figura 16 - Distribuição da umidade e formação do <i>Filter Cake</i>	75
Figura 17 - (a) Protótipo de Leito de Drenagem I desenvolvido por Cordeiro (2001), utilizado por Barroso (2007). (b) vista geral dos dois protótipos usados nos ensaios de desaguamento por Barroso (2007). (c) Dimensões do leito de drenagem I utilizados por Barroso (2007).....	80
Figura 18 -(a) Vista do Leito de Drenagem II utilizado por Barroso (2007). (b) protótipos cilindros do Leito de Drenagem III Utilizados por Barroso (2007).....	81
Figura 19 - Módulos de LD em escala de laboratório.....	83
Figura 20 - a) “Mini leito” de drenagem utilizado por Reis (2011). (b) despejo no “minileito” de drenagem utilizado por Reis (2011).....	86
Figura 21 - (a) esquema do Leito de drenagem em escala reduzida utilizado por Silveira (2012) (b) Foto do Leito de drenagem utilizado por Silveira (2012).....	88
Figura 22 - (a) Esquema do Leito de drenagem em escala Piloto utilizado por Silveira (2012)......	88
Figura 23 - (a) Esquema do Leito de drenagem utilizado por Santos, (2012). (b) Foto do Leito de drenagem utilizado por Santos (2012).....	90
Figura 24 - Equipamento em escala de bancada construído para pesquisa de Minatel (2021).....	92
Figura 25 - Leito de drenagem construído por Fontana (2004. a) Planta dos módulos do Leito de Drenagem. b) Corte da estrutura do Leito de Drenagem.....	93
Figura 26- Leito de drenagem ETA Guaira - (a) Disposição do Geotêxtil. (b) Leito de drenagem com aplicação do lodo. (c) Lodo Seco.....	94
Figura 27 - Fluxograma de implantação de sistema de reuso e drenagem de resíduos de ETA com filtração direta da cidade Colmeia-TO.....	96
Figura 28 - Fluxograma com as etapas constituintes da pesquisa.....	98
Figura 29 - Coleta de lodo no decantador.....	99
Figura 30 - Etapas correspondentes ao tratamento de água da ETA Carlos Botelho.....	100
Figura 31- Esquema de instalação e detalhe do Sistema de desaguamento de lodo em Leito de Drenagem (LD).....	105
Figura 32 - Foto da preparação do Sistema de desaguamento de lodo em Leito de Drenagem (LD) utilizado nesta pesquisa.....	106
Figura 33 - Foto dos cinco tubos de acrílico em funcionamento do Sistema de desaguamento de lodo em Leito de Drenagem (LD) utilizado nesta pesquisa.....	106
Figura 34 - Fotografia de ensaio SP a) com H10, H30 e H50 cm (da esquerda para a direita).....	108
Figura 35 - Preparação da solução polimérica. a) pesagem da massa em balança analítica Micronal B400; b) Agitação do polímero com água destilada no agitador magnético Fisatom e c) soluções poliméricas preparadas nos balões volumétrico de 1 litro.....	111
Figura 36 - Ensaio de cone a) aspecto do lodo com aplicação do polímero; b) ensaio de cone: início e fim do vertimento do lodo -após 10 minutos c) lodo retido e d) volume filtrado.....	112
Figura 37 - Ensaio de cone realizado no sistema de LD.....	114
Figura 38 - Fotografia de ensaio CP-cone a) com H10, H30 e H50 cm b) água drenada para H50 cm e c) aspecto do lodo retido.....	116
Figura 39 - Configuração do ensaio alternativo.....	117
Figura 40 - Geossintéticos testados a) GTNT400; b) GTNT600; c) GTNT900; d) GT80.....	119

Figura 41 - Equipamentos utilizados para ensaios de caracterização dos geotêxteis (a) ensaio de permissividade (b) ensaio de espessura (c) ensaio de massa por unidade de área (d) ensaio de tração a faixa larga.....	121
Figura 42 - Aspecto do geotêxtil a) aspecto do lodo úmido sob o geotêxtil; b) geotêxtil úmido após a raspagem do lodo e c) aspecto do geotêxtil seco, apenas com os sólidos finos restantes.....	124
Figura 43 - Aspecto do lodo a) lodo úmido que foi raspado do geotêxtil acondicionado no cadinho e b) aspecto do lodo seco.....	125
Figura 44 - Resistência à tração-sentido transversal e longitudinal (GTNT400, GTNT600 e GTNT900).....	133
Figura 45 - Comparação do polímero C495 C=0,05%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 20 ml/L para GTNT400- ensaio de cone.....	135
Figura 46 - Comparação do polímero A130 C=0,05%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 5 ml/L para GTNT600- ensaio de cone.....	136
Figura 47 - Comparação do polímero A110 C=0,05%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 20ml/L para GTNT900- ensaio de cone.....	136
Figura 48 - Comparação do polímero C496 C=01%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 10 ml/L para GT80- ensaio de cone.....	137
Figura 49 - Comparação do polímero C495 C=0,05%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 10 ml/L para GTNT400- ensaio alternativo.....	138
Figura 50 - Comparação do polímero A110 C=0,1%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 20 ml/L para GTNT600- ensaio alternativo.....	138
Figura 51 - Comparação do polímero A110 C=0,2%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 20 ml/L para GTNT900- ensaio alternativo.....	139
Figura 52 - Comparação do polímero A110 C=0,1%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 5 ml/L para GT80- ensaio alternativo.....	139
Figura 53- Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT400 - SP triplicata*.....	147
Figura 54- Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT600 - SP triplicata.....	147
Figura 55- Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT900 SP- triplicata*.....	148
Figura 56 - Taxa de drenagem x tempo decorrido GT80 SP- triplicata.....	148
Figura 57 - Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT 400 - CP cone triplicata.....	152
Figura 58 - Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT 600 - CP cone triplicata.....	152
Figura 59 - Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT 900 - CP cone triplicata.....	153
Figura 60 - Taxa de drenagem x tempo decorrido GT80 - CP cone triplicata.....	153
Figura 61- Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT400 - CP alternativo triplicata.....	155
Figura 62- Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT600 - CP alternativo triplicata.....	156
Figura 63- Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT900 - CP alternativo triplicata.....	156
Figura 64- Taxa de drenagem x tempo decorrido GT80 - CP alternativo triplicata.....	157
Figura 65 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT 400-SP triplicata*.....	163
Figura 66 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT 600-SP triplicata.....	163
Figura 67 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT 900-SP triplicata.....	164
Figura 68 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GT80-SP triplicata.....	164
Figura 69 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT400- CP cone triplicata.....	167
Figura 70 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT600- CP cone triplicata.....	168
Figura 71 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT900- CP cone triplicata.....	168
Figura 72 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GT80- CP cone triplicata.....	169
Figura 73 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT 400- CP alternativo triplicata.....	172
Figura 74 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT 600- CP alternativo triplicata.....	173
Figura 75 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT 900- CP alternativo triplicata.....	173
Figura 76 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GT80- CP alternativo triplicata.....	174
Figura 77- % Massa retida média x carga hidráulica para os ensaios SP, CP- cone e CP - alternativo a) GTNT400; b) GTNT600; c) GTNT900 e d) GT80.....	179
Figura 78 - Teor de umidade do lodo x carga hidráulica para os ensaios SP, CP- cone e CP - alternativo a) GTNT400; b) GTNT600; c) GTNT900 e d) GT80.....	180
Figura 79 - ST médio do drenado e sobrenadante e EF média a) GTNT400 e b) GTNT600.....	186
Figura 80 - ST médio do drenado e sobrenadante e EF média c) GTNT900 e d) GT80.....	187
Figura 81 - SST e SDT médio e Eficiência de remoção de SST média (%) para drenado e.....	192
Figura 82- SST e SDT médio e Eficiência de remoção de SST média (%) para drenado-GTNT600.....	192

Figura 83 - SST e SDT médio e Eficiência de remoção de SST média (%) para drenado e sobrenadante – GTNT900	193
Figura 84 -SST e SDT médio e Eficiência de remoção de SST média (%) para drenado –GT80	193
Figura 85 - Turbidez média do drenado e sobrenadante a) GTNT400; b) GTNT600; c) GTNT900 e d) GT80	199
Figura 86 - Cor aparente média do drenado e sobrenadante a) GTNT400; b) GTNT600; c) GTNT900 e d) GT80	204
Figura 87 – pH médio do drenado e sobrenadante a) GTNT400; b) GTNT600; c) GTNT900 e d) GT80	208

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos resíduos de diferentes ETAs no Brasil.....	30
Tabela 2 - Características do lodo bruto no momento da disposição nos leitos de secagem	31
Tabela 3 - Parâmetros para caracterização de resíduo de ETA	31
Tabela 4 - Série de sólidos de lodo utilizados na pesquisa de Fontana	32
Tabela 5 - Ilustração esquemática das diversas etapas e métodos de tratamento de resíduos gerados em ETAs	36
Tabela 6 - Relação de resultados analíticos no lodo desaguado de uma ETA.....	36
Tabela 7 - Principais vantagens e desvantagens das tecnologias de desaguamento por sistemas mecânicos e naturais	37
Tabela 8 - Desaguamento de lodo proveniente da descarga do decantador em leito de drenagem	40
Tabela 9 - Concentração de ST ao longo do tempo.....	41
Tabela 10 - Características da água drenada ao longo do tempo.....	41
Tabela 11 - Características do geotêxtil utilizada nos ensaios de desaguamento em Leito de Drenagem (LD).....	42
Tabela 12- Fases do desaguamento de lodo em sistemas de LD	43
Tabela 13 - Condições de enquadramento do drenados	44
Tabela 14 - Resumo dos tipos de polímeros mais utilizados	47
Tabela 15 - Resultados dos polímeros testados nos ensaios de cone.....	56
Tabela 16 - Tabela - resumo dos autores que utilizaram condicionamento de lodos para desaguamento ..	58
Tabela 17 - Principais funções dos Geossintéticos para drenagem e filtração	59
Tabela 18 - Terminologia dos Geossintéticos	60
Tabela 19 - Principais características e propriedades dos geotêxteis.....	61
Tabela 20 - Matérias -primas dos geossintéticos.....	62
Tabela 21 - Tabela resumo de pesquisas realizadas com geotêxteis.....	66
Tabela 22 - Resumo geral das pesquisas brasileiras com LD e geotêxteis utilizados.....	76
Tabela 23 - Características do lodo bruto disposto nos leitos de secagem	79
Tabela 24 - Características do lodo desaguado em cada leito ao final do experimento.....	80
Tabela 25 - Teor de sólidos nos desaguamentos realizados por Barroso (2007)	82
Tabela 26 - Característica do resíduo anterior a aplicação nos LD	82
Tabela 27 - Características do resíduo estudado na instalação do LD.....	84
Tabela 28 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de drenagem/secagem	85
Tabela 29 - Evolução do teor de sólidos nos ensaios realizados por Reis (2011)	87
Tabela 30 - Resultados dos ensaios de desaguamento por LD realizados por Silveira (2012).....	89
Tabela 31 – Resumo dos resultados observados por Santos (2012)	90
Tabela 32 - Cálculo da TAS pra concentração de 2%.....	102
Tabela 33 - Métodos usados na caracterização dos lodos de ETA e mistura inicial utilizados na pesquisa recomendados por Barroso (2007)	103
Tabela 34 - Características dos polímeros testados	109
Tabela 35 - Sistematização dos ensaios - testes de cone	113
Tabela 36 - Quantidade de polímeros adicionados a mistura para os geotêxteis ensaiados (CP - cone) ..	115
Tabela 37 - Quantidade de polímeros adicionados a mistura para os geotêxteis ensaiados (CP – alternativo)	118
Tabela 38 - Sistematização dos ensaios –método alternativo.....	118
Tabela 39 - Especificações dos geossintéticos utilizados nesta pesquisa	120
Tabela 40 - Ensaio de caracterização dos geotêxteis	120
Tabela 41 - Resumo das análises realizadas.....	123
Tabela 42 - Parâmetros considerados nas inferências estatísticas e as hipóteses consideradas	128
Tabela 43 - Massa por unidade de área média dos geotêxteis não-tecidos.....	131
Tabela 44 - Espessura nominal dos geotêxteis não-tecidos	132
Tabela 45 - Permissividade e permeabilidade dos geotêxteis não-tecidos	132
Tabela 46 - Valores de abertura de filtração e resistência à tração dos GT80	132
Tabela 47 - Resultados dos ensaios para GT80	133
Tabela 48 - Resistência à tração, desvio padrão e coeficiente de variação.....	133
Tabela 49 - Resultado do ensaio de Metais, pH e teor de sólidos	134
Tabela 50 - Resultados dos melhores polímeros derivados dos ensaios de cone.....	135
Tabela 51 - Resultados dos melhores polímeros derivados dos ensaios alternativos	137
Tabela 52 - Sistematização dos ensaios realizados.....	143

Tabela 53 - Resumo dos ensaios SP, CP- cone e CP- alternativo – Taxa de drenagem inicial e tempo de ensaio.....	159
Tabela 54 - Resumo dos ensaios SP, CP- cone e CP- alternativo – % removida e tempo.....	175
Tabela 55 - Massa retida média (%) e teor de umidade do lodo médio para os ensaios SP, CP-cone e CP-alternativo: GTNT400, GTNT600, GTNT900 e GT80	181
Tabela 56 - ST médio do drenado, sobrenadante para os ensaios SP, CP-cone e CP- alternativo e Eficência de filtração média (%) : GTNT400, GTNT600, GTNT900 e GT80.....	188
Tabela 57 - SST e SDT médio do drenado, sobrenadante para os ensaios SP, CP-cone e CP- alternativo e Eficência de remoção de SST (%) : GTNT400, GTNT600, GTNT900 e GT80	194
Tabela 58 - Turbidez média do drenado e sobrenadante para os ensaios SP, CP- cone e CP- alternativo: GTNT400, GTNT600, GTNT900 e GT80	200
Tabela 59 - Cor aparente do drenado e sobrenadante para os ensaios SP, CP- cone e CP- alternativo: GTNT400; GTNT600, GTNT900 e GT80	205
Tabela 60 – pH médio do drenado e sobrenadante para os ensaios SP, CP- cone e CP- alternativo: GTNT400; GTNT600, GTNT900 e GT80	209
Tabela 61- Massa retida e massa retida média seca dos ensaios realizados: SP, CP- cone e CP- alternativo referentes ao GTNT400, GTNT600, GTNT900 e GT80.....	211
Tabela 62- Resultados da estatística de teste (T) considerando as massas retidas secas dos quatro GTs analisados independentemente da carga hidráulica aplicada.....	213
Tabela 63 - Valores de <i>p-valor</i> para o teste de postos com sinais de <i>Wilcoxon</i>	214
Tabela 64 - <i>p-valor</i> obtidos para o teste pareado de postos com sinais de <i>Wilcoxon</i> , aplicado ao experimento com polímero escolhido pelo método do cone e pelo método alternativo, considerando nível de confiança de 85%.....	217
Tabela 65 - Valores de T e <i>p-valor</i> obtidos do teste de <i>Wilcoxon</i> pareado, considerando nível de confiança de 95%, nível de significância α de 5%, aplicados entre as amostras de lodo sem ou com polímero em função do geotextil empregado	220

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Diâmetro
EF	Eficiência de filtração
ESST	Eficiência de remoção de sólidos suspensos totais (%)
H	Altura (m)
K	Permeabilidade (m/s)
K_n	Permeabilidade normal do geotêxtil (cm/s)
K_p	Permeabilidade ao longo do plano do geotêxtil (cm/s)
M_A	Massa por unidade de área (g/m^2)
M_R	Massa retida no geotêxtil (g)
M_f	Massa do geotêxtil no final do ensaio (g)
M_i	Massa do geotêxtil no início do ensaio (g)
n	Porosidade
O_{95}	Abertura de filtração
p_f	Massa específica das fibras (g)
SST_i	Concentração de sólidos suspensos totais inicial (mg/L)
SST_f	Concentração de sólidos suspensos totais final (mg/L)
T_{GT}	Espessura do geotêxtil sob tensão normal (mm)
T_i	Turbidez inicial
T_f	Turbidez final
V	Volume (L)
V_{LODO}	Volume de lodo (L)
C_{LODO}	Concentração de Lodo
$V_{AGUA DEC.}$	Volume de água do decantador (L)
$C_{AGUA DEC.}$	Concentração de Lodo
Ψ	Permissividade (s^{-1})
θ	Transmissividade (cm^2/s)

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Sigla	Definição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALAF	Água de Lavagem dos Filtros
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	Com Polímero
CP-cone	Com Polímero, derivados dos ensaios de cone
CP-alternativo	Com Polímero, derivados dos ensaios alternativos
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EF	Eficiência de Filtração
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GT	Geotêxtil tecido
GTNT	Geotêxtil Não-Tecido
GM	Gabinete do Ministro
H	Altura
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LCE	Laboratório de Caracterização Estrutural
LD	Leito de Drenagem
MO	Matéria Orgânica
MS	Ministério da Saúde
NBR	Norma Técnica
PAA	Porcentagem de Área Aberta
PAC	Policloreto de Alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
SCR	Sistema de Confinamento de Resíduos
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SF	Sólidos Fixos

SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SP	Sem Polímero
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TAS	Taxa de Aplicação de Sólidos
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos

SUMÁRIO

1.	Introdução e Justificativa.....	20
1.1	Objetivos	23
2.	Revisão da Literatura.....	24
2.1	Panorama geral da Água de Abastecimento.....	24
2.2	Legislações aplicada ao lodo e as ETAs	25
2.3	ETAs de ciclo completo e a geração de resíduos	27
2.4	Lodos de Estação de Tratamento de Água: aspectos gerais.....	28
2.5	Sistemas de desaguamento de lodo de ETA	35
2.5.1	Leitos de drenagem (LDs)	39
2.6	Condicionamento químico do lodo e aplicações no desaguamento.....	44
2.6.1	Ensaio de cone geotêxtil	52
2.7	Geotêxteis.....	59
2.7.1	Geossintéticos para filtração e drenagem	59
2.7.2	Mecanismos de filtração em solos com uso de geossintéticos	63
2.7.3	Filtração de partículas em suspensão.....	66
2.7.4	Propriedades dos geotêxteis aplicados à filtração.....	67
2.7.4.1	Propriedades físicas	68
2.7.4.2	Propriedades mecânicas	70
2.7.4.3	Propriedades hidráulicas	71
2.7.4.4	Durabilidade.....	72
2.8	Colmatação.....	73
2.9	Geotêxteis utilizados em pesquisas de desaguamento com LD.....	76
2.10	Leito de Drenagem: pesquisas em escala laboratorial e piloto	79
2.11	Leito de Drenagem: pesquisas em escala real.....	92
3.	Material e Métodos.....	97
3.1	Coleta de lodo e água do decantador.....	99
3.2	Caracterização dos sólidos do lodo e preparação das amostras	100
3.3	Descrição do ensaio de desaguamento do lodo.....	103
3.3.1	Equipamento para os ensaios – Instalação	104
3.3.2	Protótipo do Sistema de Leito de Drenagem	104
3.3.3	Ensaio sem Polímero (SP).....	106
3.3.4	Ensaio com Polímero (CP).....	108
3.3.4.1	Seleção dos polímeros	109
3.3.4.2	Descrição do ensaio de cone	110
3.3.4.3	Ensaio CP-cone	114
3.3.4.4	Descrição do ensaio alternativo	116
3.3.4.5	Ensaio CP-alternativo	118
3.4	Ensaios para caracterização dos geotêxte.....	119
3.5	Parâmetros Monitorados	121
3.5.1	Medição de Vazão dos ensaios de desaguamento	121
3.5.2	Qualidade do líquido drenado	122
3.5.3	Massa retida seca no geotêxtil (M_R seca) e teor de umidade do lodo retido	123
3.6	Critérios de eficiência	125
3.6.1	Eficiência de remoção de sólidos em suspensão totais (E_{SST}).....	125

3.6.2	Eficiência de Filtração (EF).....	125
3.7	Análise dos resultados dos ensaios de desaguamento SP e CP.....	126
3.8	Análise estatística dos dados.....	128
4.	Apresentação e discussão dos resultados.....	131
4.1	Caracterizações dos geossintéticos.....	131
4.2	Caracterização do lodo bruto.....	134
4.3	Resultados dos ensaios de cone e alternativo.....	134
4.4	Ensaio SP, CP-cone e CP- alternativo.....	141
4.4.1	Análise da Relação Taxa de drenagem x Tempo decorrido.....	144
4.4.1.1	Ensaio SP.....	144
4.4.1.2	Ensaio CP- cone.....	149
4.4.1.3	Ensaio CP – alternativo.....	154
4.4.2	Análise da variação do percentual de água livre drenada pela taxa de drenagem.....	160
4.4.2.1	Ensaio SP.....	160
4.4.2.2	Ensaio CP- cone.....	165
4.4.2.3	Ensaio CP- alternativo.....	169
4.4.3	Análise da massa retida seca no geotêxtil (M_R seca) e teor de umidade do lodo retido.....	176
4.4.4	Análise da Qualidade dos Drenados.....	182
4.4.4.1	Análise dos Sólidos totais e Eficiência de Filtração (EF).....	182
4.4.4.2	Análise de Sólidos em suspensão totais, Sólidos dissolvidos totais e Eficiência de remoção de sólidos em suspensão totais (E_{SST}).....	189
4.4.4.3	Análise da Turbidez.....	196
4.4.4.4	Análise da Cor Aparente.....	201
4.4.4.5	Análise do pH.....	206
4.5	Análise estatística dos ensaios: SP, CP-cone e CP- alternativo.....	210
4.5.1	Análise estatística dos Tipos de Geotêxteis.....	213
4.5.2	Análise estatística da carga hidráulica aplicada.....	214
4.5.3	Análise estatística do tipo de ensaio para determinação do polímero (Cone/Alternativo).....	216
4.5.4	Análise estatística para o emprego de polímero no lodo.....	219
5.	Conclusões.....	221
6.	Sugestões de pesquisas futuras.....	223
	Referências bibliográficas.....	225
	ANEXO.....	240

1. Introdução e Justificativa

A geração de resíduos, lodo dos decantadores e água de lavagem dos filtros, em uma Estação de Tratamento de Água (ETA) de ciclo completo é contínua e sua produção é de grande volume. Esses materiais são procedentes dos decantadores ou flotadores.

Como qualquer resíduo dentro de um sistema, ele precisa ser removido com a finalidade de manter a Estação em perfeito funcionamento. Além de sua remoção, o tratamento, uso benéfico e/ou disposição de maneira segura é imprescindível para evitar ou minimizar os passivos ambientais.

Somados a esses fatores, o crescimento populacional exacerbado em áreas urbanas e o desenvolvimento da tecnologia da sociedade atual demandam técnicas de produção de insumos mais aprimorados que tragam à população bem-estar e qualidade de vida.

Neste contexto, a universalização do saneamento envolve a busca de uma infraestrutura com alto grau de aperfeiçoamento nas Estações. Porém, como todo processo produtivo, o aumento da produção, amplia a geração de resíduos ao invés de diminuir sua geração. Estes resíduos produzidos em grande volume, muitas vezes retornam aos mananciais, comprometendo sua qualidade.

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, no ano de 2017 a destinação do lodo aumentou em 23% para aterros sanitários e 7% para outras formas de reaproveitamento, contudo, esses números ainda são muito incipientes. (PNSB, 2017).

Estudos de Achon e Cordeiro (2016), sobre a destinação e disposição do lodo mostraram que em 22 ETAs de uma das principais sub-bacias, localizada no Estado de São Paulo, 77% lançavam este resíduo em corpos d'água, 9% lançavam no solo, 14% dispunham em aterros após desaguamento e nenhuma ETA reciclava ou reutilizava o lodo.

O lodo produzido nas Estações é classificado como resíduo sólido, segundo NBR 10.004/2004 e, portanto, deve atender aos preceitos da Lei 12.305/2010, que pressupõe a destinação ambientalmente adequada dos resíduos do saneamento, destacando a redução, reúso e reciclagem deste material. Ademais o lançamento deste lodo em corpos d'água infringem as Leis 9.605/1998 e 9.433/1997, ambas vigentes.

O lodo de ETA apresenta alto teor de umidade, acima de 95%, (MINATEL, 2021), e portanto, um tratamento faz-se necessário antes de algumas formas de destinação final. Para que ele seja projetado adequadamente, o lodo deve ser caracterizado quimicamente. Deve-se, também, conhecer a tecnologia de tratamento da

água adotada, os produtos químicos utilizados, as formas de remoção de lodo e o tempo de acúmulo deles nas Estações, entre outras especificidades.

Além da caracterização do resíduo, o desaguamento cujo objetivo é a remoção da parcela de água e diminuição do volume do lodo, pretende ensinar a reutilização da água drenada, podendo ser realizada na própria Estação, dependendo da qualidade desta água. Ademais, estando o lodo desaguado a sua destinação e/ou disposição final resulta em custos menores a esses sistemas.

A definição do tipo de sistema de desaguamento a ser utilizado provém de um estudo sobre a área necessária para implantação (disponibilidade e custo), custos de implantação (equipamentos necessários), operação do sistema, necessidade de energia elétrica e produtos químicos, condições climáticas, distância da Estação ao destino ou disposição final, entre outros fatores.

Os sistemas de desaguamento de lodo podem ser naturais ou mecânicos. Os sistemas naturais são normalmente abertos, com exceção dos SCR (sistema de confinamento de resíduos). Os sistemas abertos possuem como aspectos favoráveis: baixo custo de implantação e operação, simplicidade operacional e necessidade de mão de obra pouco especializada para operação, baixo consumo de energia elétrica, redução do volume do lodo após a fase de desaguamento, através da secagem natural (por evaporação), pequena ou nenhuma utilização de produtos químicos, porém, necessitam de maior área disponível. Por sua vez, os sistemas mecânicos são sistemas fechados, podendo ser de alto custo, pois além do custo dos equipamentos, utilizam energia elétrica e produtos químicos (DI BERNARDO E DANTAS, 2005).

Como exemplo de sistema natural, o leito de drenagem (LD) sugerido primeiramente por Cordeiro (2001), tem se apresentado como oportuno em promover o desaguamento de resíduos de ETAs de médio e pequeno porte, em locais que tenham área disponível, clima favorável, destacando assim, os países tropicais, como o Brasil. De acordo com Reis (2011) a utilização de cobertura nesses sistemas atende regiões com elevados índices pluviométricos, já que melhora a fase de secagem do lodo.

Pesquisas sobre Leitões de Drenagem (LD) em escala piloto e protótipos em escala real como realizados por Achon e Cordeiro (2003; 2004), Fontana (2004), Barroso (2007), Reis (2011), Cordeiro *et al.*, (2014), Lustosa *et al.*, (2017), Minatel (2021) sugeriram a viabilidade da aplicação do Leito de Drenagem com a utilização de geotêxteis. Entretanto, nestes trabalhos e nos estudos de Borba (2005); Achon *et al.*, (2008); Silveira e Kuroda, (2011; 2013; 2015) e Santos (2012) não foram utilizados produtos químicos no condicionamento do lodo de ETA anteriormente aos

experimentos no LD, uma vez que na própria origem do resíduo já existiam esses compostos.

Contudo, em SCR (sistema de confinamento de resíduos) a utilização de polímeros anterior a sua aplicação em sistemas de desaguamento é necessária. Estudos como de Koerner; Koerner, (2010); Satyamurthy; Bhatia (2009); Guanaes *et al.*,(2009); Lima (2016); Scalioni *et al.*, (2019) e Ardila *et al.*,(2020) mostraram que polímeros podem ser usados com sucesso em projetos de desaguamento neste tipo de sistemas, porém, é importante a realização de ensaios prévios para avaliação do condicionamento químico.

Mortara (2011) avaliou o tratamento de lodo de ETE, no qual foi utilizado o sulfato de alumínio como agente coagulante, aplicado ao sistema de leito de drenagem utilizando polímeros catiônicos como pré-tratamento, com vistas ao aumento da eficiência.

Advindo da experiência de Mortara (2011) utilizando polímeros em lodo de ETE e da aplicação de polímeros em SCR, somada a inexistência de estudos com a utilização de polímeros no condicionamento dos lodos de ETAs. Para esta pesquisa, o objetivo principal foi avaliar a eficiência e o desaguamento de lodo de ETA em LD utilizando diferentes geotêxteis e polímeros.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a eficiência e o desaguamento de lodo de ETA em Leitões de Drenagem (LDs) utilizando diferentes geotêxteis com a aplicação de polímeros como condicionantes.

Os objetivos específicos são:

- Analisar diferentes condições do sistema de LD para desaguamento de lodo de ETA com teor de sólidos fixos de 2%, diferentes alturas de camada de lodo, tipos de geotêxteis e taxa de aplicação de sólidos (TAS) e sua influência no processo de drenagem com e sem aplicação de polímeros;
- Analisar a eficiência da drenagem através de parâmetros qualitativos e quantitativos do líquido drenado e do sólido retido no LD para os ensaios sem polímero (SP) e com polímeros (CP – cone e CP – alternativo);
- Avaliar o método de cone e o alternativo para seleção de polímeros a serem aplicados nos LD;
- Avaliar qual polímero apresentou melhor resultado no condicionamento do lodo de ETA em LD;
- Aplicar critérios de eficiência para os dois tipos de ensaios (SP e CP) e qual apresentou melhor eficiência.

2. Revisão da Literatura

2.1 Panorama geral da Água de Abastecimento

Mananciais são fontes de água doce superficial ou subterrânea que podem ser utilizadas para o consumo doméstico após tratamento e para o desenvolvimento de atividades econômicas.

No Estado de São Paulo, a Política Estadual de Recursos Hídricos - Lei nº 9.7633/1991 - e a Lei Estadual de Proteção dos Mananciais - Lei nº 9.866/1997 (BRASIL, 1991; BRASIL, 1997) - incidem sobre os recursos hídricos e sobre as áreas que protegem os mananciais de abastecimento de água e incorporam a bacia hidrográfica como unidade de gerenciamento.

Em relação às águas superficiais, no Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na Resolução nº 357/2005 (BRASIL, 2005), classifica as águas em: doces, salobras e salinas, estabelecendo uma ordem em função das características física, química e biológica da água dos mananciais, determina, ainda, muitos parâmetros para caracterização destas águas e seus usos.

Em contrapartida, a violação destes parâmetros é recorrente devido a fatores como ausência de recursos materiais, financeiros e humanos dos órgãos competentes.

Outrossim, a água distribuída à população necessita atender aos padrões de potabilidade estabelecido pela Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. (BRASIL, 2021). A sua “qualidade” está atrelada primeiramente às características da bacia hidrográfica, no seu uso e ocupação e nas medidas de proteção delas.

Conforme a população cresce, a demanda por água tratada aumenta, porém sua disponibilidade é finita. Como a bacia apresenta diversidade de usos, isto pode ser um fator de elevado risco de perda da qualidade da água para o consumo humano, pois a tecnologia de tratamento de muitas ETAs se limita aos processos e operações unitários convencionais, que muitas vezes, não removem os contaminantes químicos, a exemplo de metais, hormônios e agrotóxicos (BRASIL, 1997 apud Minatel 2021).

Assim, o aumento da concentração de compostos nos mananciais exige um sistema de tecnologia mais robusto das ETAs, que necessitam remover os sólidos em suspensão e dissolvidos, gerando, além de uma maior quantidade de resíduos, uma diversidade maior. Estes resíduos necessitam de tratamento adequado, porém, conforme citam Achon e Cordeiro (2013) eles, ainda, são lançados nos corpos d'água sem o devido tratamento e acabam por comprometer cada vez mais os mananciais.

Para piorar este cenário, no Brasil, de acordo com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019) as perdas de água na distribuição são da ordem de 39,20%. Isto expõe a fragilidade deste setor. Este desperdício é advindo de inúmeros fatores, como: perdas devido ao vazamento de água tratada nas redes de distribuição, ligações clandestinas, adulteração de hidrômetros, entre outros. (BRASIL, 2020).

Somados a esses fatores, na ETA, durante o tratamento de água é utilizada uma grande quantidade de água, seja na lavagem de filtros, decantadores, floculadores e outros equipamentos que fazem parte deste sistema.

Essa água de lavagem é considerada resíduo e tratada como tal, juntamente com os lodos produzidos. Comparando o volume de água tratada, com o volume de resíduos produzidos na ETA, este correspondente a 5% do total de água produzida (CORDEIRO *et al.*, 2011).

Medidas de conscientização da população e manutenção destas redes de distribuição são imprescindíveis para a diminuição da perda de água tratada na atualidade. Além de que mais estudos são necessários sobre formas de recirculação de água dentro destas estações.

2.2 Legislações aplicada ao lodo e as ETAs

As Leis 9.433/1997 (BRASIL, 1997) e 9.605/1998 (BRASIL, 1998) e a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 237/1997 (BRASIL, 1997), prevê o licenciamento ambiental das atividades potencialmente poluidoras, como é o caso das ETAs.

Todavia, a maior parte das ETAs em funcionamento no Brasil foi construída anteriormente a essas Leis. Logo, não contemplam sistemas de destinação e disposição destes resíduos em seus projetos. Porém, na atualidade estes sistemas são requisitos para ampliações e novos projetos de ETAs. A licença de operação é renovável e a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) além de ser responsável pelo Licenciamento Ambiental no Estado de São Paulo, tem que desempenhar atividades de controle de poluição.

Para complementar este cenário muitas Estações lançam seus resíduos em corpos d' água sem nenhum tipo de pré-tratamento, desobedecendo as Lei 9.605/1998 e 9.433/1997. (ACHON; CORDEIRO, 2013). Assim, ao mesmo tempo em que os rios são provedores de água para abastecimentos e necessitam de uma qualidade favorável, são receptores de muitos resíduos, como o lodo e a água de lavagem de filtros, por exemplo,

que podem conferir qualidades indesejáveis para esta água, prejudicando o meio ambiente e a qualidade de vida das pessoas que moram próximas a esses locais ou necessitam desta água para o consumo, já que os custos do tratamento são repassados à população, que teoricamente pagará mais para tê-la disponível e potável.

Outrossim, a Lei 9.433/97 instituiu que o lançamento de resíduos líquidos, sólidos ou gasosos, tratados ou não, com a finalidade de diluição, transporte ou disposição final em corpos d'água, além de outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água, necessita de outorga do Poder Público. (BRASIL, 1997).

A Lei 9.605/98 (Lei de Crimes Ambientais) (BRASIL, 1998) dispõe que “ o lançamento dos resíduos advindos de ETAs em corpos d'água é crime ambiental, pois causam efeitos diretos na fauna e flora aquática”.

Em relação às normas, salienta-se as Resoluções do CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) e nº 430 (BRASIL, 2011) e o Decreto do Estado de São Paulo 8.468/1976 (BRASIL, 1976) que estabelece classes de enquadramento dos corpos d' água e cita que os efluentes de qualquer fonte poluidora, só podem ser lançados direta ou indiretamente nos corpos receptores após o tratamento e obedecendo o enquadramento dos mesmos.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº12.305 de 2 de agosto de 2010), (BRASIL, 2010) resíduo sólido “é um material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.” Neste contexto, os lodos produzidos nas ETAs e ETEs são caracterizados como resíduos sólidos.

Já, os rejeitos são “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”. A maioria dos materiais provenientes da mineração são caracterizados como rejeitos, alguns ainda podem ser reusados.

A NBR 10.004 de 2004 (ABNT, 2004) é uma norma de classificação para os resíduos sólidos e inclui em sua definição os lodos provindos de sistemas de tratamento de água. Cita, também, a proibição do lançamento destes materiais na rede pública de esgotos ou corpos de água. A Lei nº12300/2006, (BRASIL, 2006) que estabelece a Política Estadual de Resíduos Sólidos, classifica os resíduos provenientes de ETAs

como resíduos sólidos industriais, e também proíbe o seu lançamento na rede de esgotos, em solos, ou a céu aberto.

Primeiramente deve - se pensar na redução na geração de resíduos sólidos. Assim, a geração de lodos necessita de uma destinação ambientalmente viável e adequada visando primeiramente a redução, reúso e reciclagem e, somente, os rejeitos devem ser encaminhados para disposição final em aterros sanitários.

Como são produzidas grandes quantidades de lodos nas estações de tratamento de água e esgoto, muitos pesquisadores (Cordeiro, 2001; Achon e Cordeiro 2003; 2004, Fontana, 2004 e Cordeiro *et al.*, 2014) vêm estudando formas de desaguamento caracterizadas como leitos de drenagem (LD). Estes sistemas permitem o reúso e reciclagem de lodo, além da diminuição do volume destes materiais, estando em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) que prevê majoritariamente a redução da produção destes resíduos.

2.3 ETAs de ciclo completo e a geração de resíduos

Dentro de uma ETA seja ela de ciclo completo, filtração lenta ou direta a qualidade da água bruta é o primeiro parâmetro que antecede o tratamento de água, visto que é com esta caracterização que será escolhida a técnica mais adequada de tratamento (MINATEL, 2021).

A NBR 12.216 (ABNT, 1992) classifica as águas superficiais e subterrâneas adotando nomenclaturas de “tipos de água”, classificando-as de A a D, sendo a água tipo A, de melhor qualidade, requerendo apenas desinfecção e correção de pH, por exemplo. Já, as águas tipo D, precisariam de tratamentos especiais para atender aos padrões de potabilidade. Ainda, indicam parâmetros de DBO, coliformes, pH, cloretos e fluoretos para cada tipo de água.

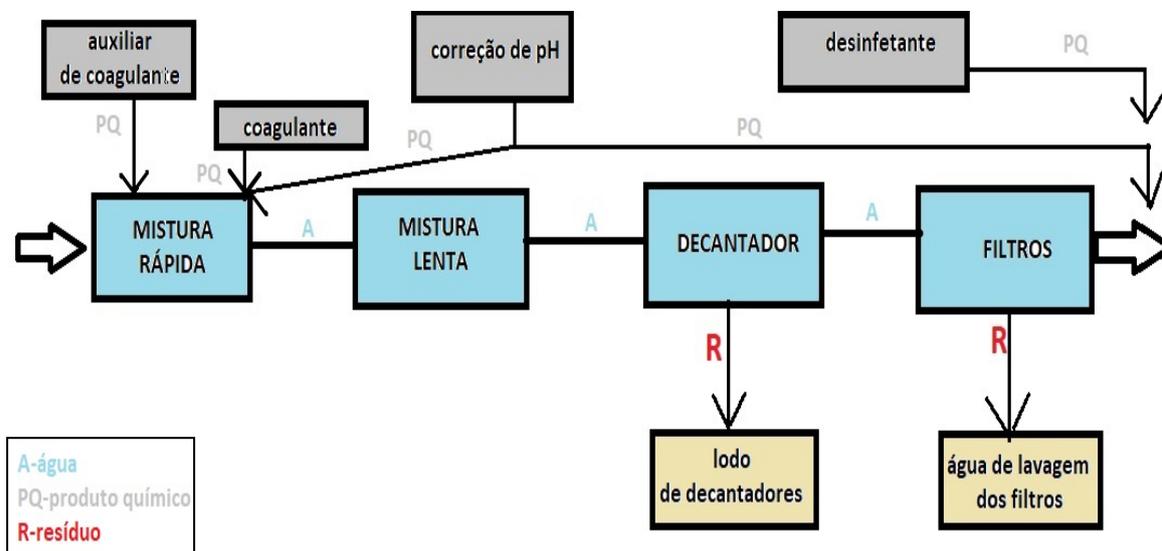
Segundo o IBGE/PNSB (BRASIL, 2010), no Brasil, cerca de 70% da água tratada e distribuída são provenientes de ETAs de ciclo completo.

Na Figura 1, é apresentado o esquema do processo de tratamento de uma ETA de ciclo completo, indicando, respectivamente, as etapas onde os resíduos são gerados, ou seja, nas unidades de decantação e, na filtração. Assim, o desempenho de uma unidade influi nas etapas à jusante, por isso o sistema de uma ETA deve ser analisado como um todo.

Resumidamente, as principais operações unitárias são: coagulação (através da mistura rápida, cujo resultado é a desestabilização das partículas – coloides, presentes na água bruta, podendo alterar o valor de pH, o que demanda sua correção); floculação

(formação de flocos, dentro dos tanques com gradientes de velocidades definidos - mistura lenta); decantação (sedimentação dos flocos no fundo dos tanques); flotação (processo inverso da decantação); filtração (passagem da água por camadas de areia para retenção das partículas sólidas ainda presentes); desinfecção (eliminação de organismos patogênicos com aplicação de cloro ou outro desinfetante); correção de pH (proteção contra a corrosão das redes de distribuição que ocorrem por conta da adição de cal) e fluoretação (adição de flúor para prevenção de carie). Esta última etapa é realizada em atendimento à uma das exigências do Ministério da Saúde; de acordo com o anexo 9 da Portaria nº 888 do Ministério da Saúde. tem-se os valores máximos permitidos para concentração de íon fluoretos. (BRASIL, 2021).

Figura 1 - Ilustração de uma ETA convencional e locais de geração de resíduos



Fonte: modificado de Barroso (2007).

2.4 Lodos de Estação de Tratamento de Água: aspectos gerais

A coagulação, a floculação com sulfato de alumínio, a decantação e a filtração são os processos mais utilizados no Brasil para proceder a clarificação da água nas ETAs, tendo como inconveniente a produção de dois tipos de resíduos principais: o lodo sedimentado no fundo dos decantadores, que contém materiais inertes, materiais orgânicos e precipitados químicos, incluindo hidróxidos de alumínio em grande quantidade e a água de lavagem dos filtros (ALAF), constituídos por resíduos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta, por hidróxidos de alumínio resultantes da adição de produtos coagulantes e, eventualmente, por polímeros condicionadores do processo. Possuem baixa concentração de sólidos, uma vez que para sua descarga é

utilizada grande quantidade de água e alta concentração de alumínio. (Viessman Jr e Hammer, 1998).

Conforme Albrecht (1972), citado por Pieper (2008) o lodo de estação de tratamento de água (ETA) comporta-se como um fluido não-newtoniano, extremamente gelatinoso e tão compressível que resiste à passagem de água através dele devido à estrutura de formação dos flocos durante o processo de coagulação-floculação. O lodo é resistente ao adensamento, principalmente quando a água bruta possui baixa turbidez. É composto por hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas como argilas e areia; colóides, cor e micro-organismos, incluindo plâncton e outros materiais orgânicos e inorgânicos, removidos da água que está sendo tratada e composto por lodo dos decantadores e floculadores, lavagem dos filtros, lodo da recuperação da água de lavagem ou uma combinação deles. Os sólidos fixos representam de 75% a 90% dos sólidos totais, enquanto os voláteis 20% a 35%. O lodo adensado possui teor de sólidos totais de 8 a 10%.

Em termos volumétricos, a maior quantidade é produzida na lavagem dos filtros. (DI BERNARDO e DANTAS, 2005), no entanto, dado que uma grande quantidade de água é empregada na sua descarga, os efluentes apresentam baixa concentração de sólidos. Em termos de massa, a maior quantidade de lodo é gerada no sistema de separação sólido/líquido, ou seja, nos decantadores.

Conforme observado em Barroso e Cordeiro (2001), a quantidade de sólidos presentes no lodo dos decantadores supera em até 500 vezes a de sólidos da ALAF.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005) a diferença na concentração de sólidos entre esses lodos é justificada por questões operacionais das ETAs, pois a lavagem dos filtros é realizada em intervalos de 12 a 48 horas, com duração de 4 a 15 minutos e possuem um teor de sólidos entre 0,01% a 0,05%. Já a limpeza dos decantadores convencionais sem equipamento de extração de lodo geralmente acontece em intervalos de 1 a 4 meses, já que seus resíduos são bem mais concentrados, com teor de sólidos geralmente na faixa de 4 a 13%.

Centurione Filho (2002) relata que o teor de sólidos de lodos proveniente de decantadores de alta taxa ou convencionais com equipamentos de remoção de lodo que realizam descargas diárias fica em torno de 0,1 a 1%.

A granulometria média dos resíduos sólidos gerados em ETAs, conforme a NBR 7181/84 (ABNT, 1984) mostra essencialmente a presença de areias em maiores porcentagens e argila e silte em menores proporções, mas, isso depende da ETA.

De acordo com Barroso (2007) na Tabela 1 encontram-se as características dos resíduos de decantadores e de água de lavagem de filtros (ALAF) de diferentes ETAs brasileiras.

Tabela 1 - Características dos resíduos de diferentes ETAs no Brasil

Parâmetros	Unidade	Lodo dos decantadores			Água de lavagem dos filtros	
		ETA 1 ^(a) (DC)	ETA 2 ^(b) (DC)	ETA 3 ^(c) (DAT)	ETA 1 ^(d)	ETA 3 ^(e)
pH	-	7,2	7,4	8,93	6,9	8,4-9,2
Sólidos sedimentáveis	ml/L	-	-	-	3,4	-
Sólidos suspensos	mg/L	26520	15330	775	59	200 - 440
Alumínio	mg/L	11100	30	2,16	0,3	-
Arsênio	mg/L	-	-	-	-	-
Cádmio	mg/L	0,02	0,27	ND	ND	ND
Chumbo	mg/L	1,6	1,06	ND	ND	0-1,5
Cobre dissolvido	mg/L	2,06*	0,91*	1,7*	0,06*	-
Cromo VI	mg/L					
Cromo III	mg/L	1,58*	0,86*	0,19*	ND	0-0,56*
Ferro solúvel	mg/L	5000	4200	214	6,9	8,7-31,9
Mercúrio total	mg/L	-	-	-	-	-
Níquel total	mg/L	1,8	1,16	ND	ND	0-0,01
Prata total	mg/L	-	-	-	-	-
Zinco Total	mg/L	4,25	18,53	0,1	0,064	0-0,01

Fonte: modificado de Barroso (2007).

a: DC - Lodo de decantador convencional (sulfato de alumínio como coagulante).

Fonte: Barroso e Cordeiro (2001)

b: DC - Lodo de decantador convencional (utiliza cloreto férrico como coagulante).

Fonte: Barroso e Cordeiro (2001).

c: DAT - Lodo de decantador de alta taxa com descarga periódica (utiliza cloreto férrico como coagulante).

Fonte: Barroso e Cordeiro (2001).

d: Água de lavagem de filtros de ETA que utiliza Sulfato de Alumínio (Filtração com taxa constante).

Fonte: Di Bernardo *et al.*, (1999).

ND – Não detectado

e: ETA convencional alta taxa (utiliza cloreto férrico como coagulante).

Fonte: Souza (2004).

*cromo total; ferro total; manganês total, cobre total.

Aboy (1999) apresenta os resultados da análise do lodo bruto retirado de um decantador com manta de lodos, na ETA São João/Navegantes, em Porto Alegre. O teor de sólidos voláteis totais da amostra indicou a presença de matéria orgânica biodegradável no lodo bruto. A Tabela 2 apresenta as características do lodo bruto no momento da disposição nos leitos de secagem.

Tabela 2 - Características do lodo bruto no momento da disposição nos leitos de secagem

Parâmetros	Valores observados
Umidade (%)	96,50
Sólidos totais (%)	3,50
Sólidos fixos totais (%)	2,48
Sólidos voláteis totais (%)	1,02
Al (III) %	5,90
Al (III) mg/L	1,50

Fonte: Aboy, 1999.

De acordo com Barroso (2007) a concentração de sólidos nos resíduos de decantadores, pode apresentar algumas variações que dependem das:

- Características da água bruta e adequação de tecnologia adotada;
- Tipo e dosagem de produtos químicos utilizados;
- Concepção da ETA, tipo de decantadores e filtros e respectivos mecanismos de limpeza;
- Eficiência dos processos e operações envolvidos;
- Duração e intervalo de lavagens dos decantadores e filtros;
- Problemas operacionais e deficiência de recursos humanos;
- Variação sazonal da qualidade da água proveniente no manancial.

Conforme já destacado, a caracterização física e química é fundamental na avaliação ambiental de qualquer tipo de resíduo.

Os principais parâmetros que avaliam as características físicas e químicas dos resíduos de ETA encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros para caracterização de resíduo de ETA

PARÂMETROS	Teor de sólidos (orgânicos e inorgânicos);
	Turbidez;
	Cor;
	pH;

Fonte: Minatel, 2021.

Fontana (2004) apresentou a série de sólidos dos lodos utilizados em sua pesquisa. A Tabela 4 expressa os valores em concentração de sólidos, ou seja, unidade de massa por unidade de volume, sendo que também podem ser indicadas a quantidade de sólidos através do teor de sólidos (%), como sendo a unidade de massa sobre unidade de massa. Conforme observado, houve diferenças entre os lodos coletados no mesmo

decantador, destaca-se que as coletas foram realizadas com menos de 1 mês de diferença.

Tabela 4 - Série de sólidos de lodo utilizados na pesquisa de Fontana

Parâmetro	Unidade	Lodo do decantador	
		16/12/2003	06/01/2014
Sólidos em suspensão		860	850
Sólidos totais		98397	28263
Sólidos fixos		30368	20032
Sólidos voláteis	mg/L	68029	8231
Sólidos em suspensão totais		25150	28400
Sólidos em suspensão fixos		1200	5350
Sólidos em suspensão voláteis		23950	23050

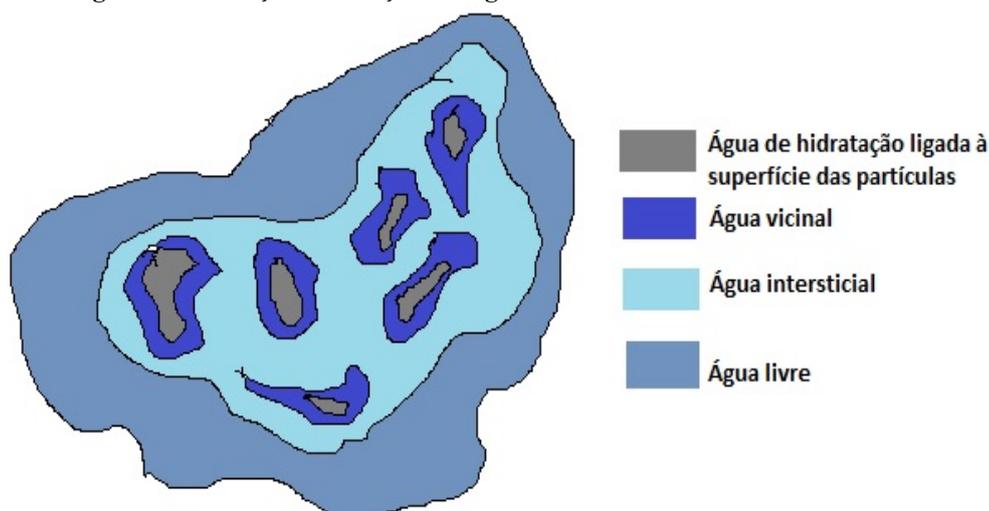
Fonte: modificado de Fontana (2004).

Conforme citado por Barroso (2007) o lodo é composto por fase sólida e líquida, sendo que a maior parcela desse resíduo corresponde à líquida.

O modelo que descreve as frações de água presentes no lodo e seus diferentes estados físicos, foi proposto por Vesilind e Hsu (1997) e Smollen e Kafaar (1994), como mostrado na Figura 2, sendo composto por:

- Água livre – água não associada aos sólidos, facilmente separada por sedimentação gravitacional simples;
- Água intersticial ou capilar – água presente no interior ou intimamente ligada aos flocos. Esta água pode ser liberada quando há quebra do floco, mediante aplicação de força mecânica, tais como centrífugas;
- Água vicinal – associada às partículas sólidas por virtude da estrutura molecular da água, pontes de hidrogênio;
- Água de hidratação – água quimicamente ligada às partículas sólidas e pode ser liberada somente por destruição termoquímica delas.

Figura 2 - Ilustração das frações de água constituintes dos lodos de ETAs



Fonte: modificado de Smollen e Kafaar (1994).

Pieper (2008) relata que a remoção natural de água livre dos resíduos de ETAs pode ser realizada por sistemas naturais de redução de volume, que são as lagoas de lodo, os leitos de secagem e os leitos de drenagem. Vale salientar que, no Brasil, o uso de sistemas naturais de tratamento de resíduos de ETAs possui grande potencial de aplicação, principalmente devido à disponibilidade de área, condições climáticas favoráveis e por ser um sistema de baixo custo, que não requer produtos químicos e energia elétrica. Algumas alternativas de tecnologias mecânicas existentes no mercado para o desaguamento de lodo de estações de tratamento de água são a prensa desaguadora, o filtro prensa, filtros a vácuo (raramente utilizada no Brasil), as centrífugas e os SCR.

No estudo realizado por Barroso (2007) foram definidas as micro e macropropriedades dos lodos de ETA que podem afetar o desaguamento por LD. Os mecanismos envolvidos no processo de drenagem foram descritos resumidamente.

1) Sedimentabilidade

Existem três tipos de sedimentação em suspensões, caracterizadas como: discreta, floclenta e sazonal.

A sedimentação discreta ocorre normalmente em lodos com baixa concentração de sólidos. A sedimentação floclenta e sazonal ocorrem devido a grandes concentrações de sólidos na suspensão e a propriedades físicas semelhantes das partículas.

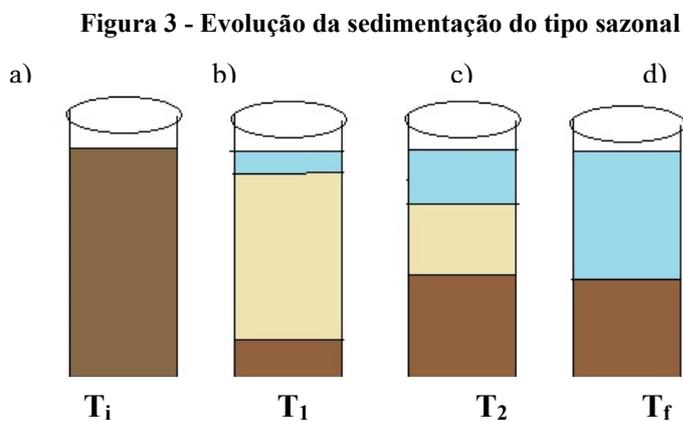
Santos, Barbosa Filho e Giordano (2005) estudaram a evolução da sedimentação. Na Figura 3 é destacada de forma simplificada a sedimentação do tipo

sazonal, denominada pelo instante T_i (Figura 3a), onde o lodo está presente em toda a altura do recipiente.

Nos instantes seguintes T_1 e T_2 , (Figuras 3b e 3c) conforme ocorre a sedimentação do lodo no fundo do recipiente, há o aumento da concentração de sólidos nas camadas inferiores e conseqüentemente a diminuição da velocidade de sedimentação até tornar-se nula, ao mesmo tempo em que é atingida a concentração máxima de sólidos no fundo ($ST_{máx}$) denominada por torta ou “cake”. No topo, observa-se o surgimento de uma camada de água livre seguida de uma interface de massa líquida de lodo muito menos densa no topo. Como a concentração de sólidos no fundo não pode exceder a $ST_{máx}$, tem-se o aumento da espessura da torta à medida que os sólidos sedimentam.

Na Figura 3d em T_f é observada a concentração de sólidos máxima ($ST_{máx}$), da qual atinge a interface entre os sólidos sedimentados e a água livre, assim como a velocidade de sedimentação do conjunto se torna nula, completando-se o processo da sedimentação.

De acordo com Barroso (2007) esses mecanismos foram observados durante a realização de ensaios em coluna de sedimentação. Para os LD ocorre a retirada ou drenagem de água a partir das camadas de fundo, concomitante a sedimentação.



Fonte: modificado de Minatel, 2021.

2) Compressibilidade

Estudos realizados por Richter (2001) demonstram que na filtração de lodos em leitos de secagem as partículas formam uma torta na superfície do meio filtrante e a massa de sólidos retida atua por si própria, como filtro. À medida que a torta de desenvolve aumenta a resistência à passagem do fluido. Esta resistência depende da porosidade ou condutividade hidráulica da torta, a qual é função do tamanho das

partículas e de sua deformação pela pressão a que está submetida. Os lodos provenientes de coagulação com sais de alumínio e ferro são, em geral, altamente compressíveis.

Barroso (2007) cita que a deformação do floco durante o desaguamento pela aplicação de pressão é definida como compressão. A principal consequência da compressão é o decréscimo da taxa de desaguamento conforme há o aumento da pressão aplicada.

3) Viscosidade

Gattes e McDermott (1968) citam que o lodo de ETA, a partir de uma determinada o teor de sólidos, comporta-se como um fluido não-Newtoniano e, sendo assim, sua viscosidade é referida como “viscosidade aparente”. Por definição, fluidos não-newtonianos não obedecem à proporcionalidade direta entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento ou deformação (MIKI, 1998 apud BARROSO 2007).

Um aumento do teor de sólidos aumenta a viscosidade do lodo e diminui o número de Reynolds, aumentando significativamente a perda de carga. Por isso, é importante dimensionar as canalizações de transporte de lodo de modo a resultarem em velocidades mais elevadas, super dimensionando a bomba. Richter (2001) afirma que velocidades menores e diâmetros maiores podem não reduzir as perdas de carga da tubulação.

2.5 Sistemas de desaguamento de lodo de ETA

O desaguamento compreendido como a remoção da parcela de água do lodo pode ser realizado em sistemas naturais ou mecânicos, abrangendo diversos métodos apresentados na Tabela 5. Seus objetivos compreendem a redução do volume com o aumento da concentração de sólidos do material, facilitando a destinação ambientalmente adequada e possibilitando o reúso de água livre e dos sólidos resultantes do processo.

Reis (2011) observou em seus estudos que o desaguamento motiva a rápida retirada da fração de água livre do lodo, além do retorno da água drenada, dependendo da qualidade desta, ao início do processo de tratamento. Na Tabela 6, tem-se as características de um lodo desaguado provindo de uma ETA.

Tabela 5 - Ilustração esquemática das diversas etapas e métodos de tratamento de resíduos gerados em ETAs

Tratamento de Água	Condicionamento	Adensamento	Desaguamento por sistemas naturais	Desaguamento por sistemas mecânicos
Filtros (ALAF)	Tanque de equalização	Mecânico por esteira		Filtro prensa
Decantador convencional	Polímeros (catiônicos e aniônicos)	Por flotação	→	Filtro a vácuo Filtro de esteira
Decantador de alta taxa		Por gravidade	→	Leito de secagem Centrífuga
Flotador				Sistemas térmicos -congelamento -pirólise -aquecimento
			→	Leito de drenagem
			→	Lagoa de lodo

Fonte: modificado de Barroso (2007).

Tabela 6 - Relação de resultados analíticos no lodo desaguado de uma ETA

Parâmetros	Unidades	Resultados
pH	-	6,4
Umidade	%	78,5
Matéria orgânica	%	13
Cinzas	%	8,5
Óleos e Graxas	Mg/kg	1637,2
Nitrogênio total	Mg/kg	5234,2
Fósforo	Mg/kg	434,9
Sulfeto	Mg/Kg	ND
Alumínio	Mg/kg	28883,7
Cádmio	Mg/Kg	ND
Chumbo	Mg/Kg	ND
Cromo	Mg/Kg	ND
Magnésio	Mg/Kg	660,5
Níquel	Mg/Kg	ND
Potássio	Mg/Kg	385,1
Sódio	Mg/Kg	1707,0
Coliformes fecais	Ufc/100ml	ausentes

Fonte: Pieper, 2008.

O Brasil em virtude do clima, espaço e recursos naturais disponíveis (matéria prima, insumos e abundância de energia proveniente do sol) apresenta condições favoráveis para o desaguamento com implantação de sistemas naturais, ao contrário de muitos países desenvolvidos que utilizam sistemas mecânicos. Aliados a esses fatores tem-se o baixo custo de instalação e operação dos sistemas naturais (BARROSO, 2007).

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005) as vantagens e as desvantagens dos dois tipos de desaguamento existentes são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Principais vantagens e desvantagens das tecnologias de desaguamento por sistemas mecânicos e naturais

Tipos de sistemas	Vantagens	Desvantagens
Mecânicos	- sistemas independentes das características climáticas da região;	- alto custo com aquisição, operação e manutenção;
	- menores áreas para implantação	- requerem pessoal qualificado para operar; -podem liberar gases tóxicos no processo que necessitam de tratamento;
Naturais	-baixo custo de energia elétrica na operação;	- custo com energia elétrica. -necessitam de áreas relativamente grandes para implantação;
	- sem necessidade de mão de obra qualificada para a operação.	- o projeto requer conhecimento das condições climáticas da região;
		- técnicas não totalmente desenvolvidas (ausência de parâmetros de projeto e operação).

Fonte: modificado de Di Bernardo e Dantas (2005).

Para o funcionamento adequado dos sistemas mecânicos de desaguamento, Ferreira Filho e Além Sobrinho (1998) destacam que é necessário um teor de sólidos de entrada superior a 2%. Essa observação é uma desvantagem para implantação deste tipo de sistema que provavelmente necessitará de adensamento anteriores ao tratamento do lodo.

Conforme já mencionado as características dos lodos brutos, escala da técnica empregada, condições climáticas e operacionais podem influenciar significativamente na eficiência do desaguamento. Estimam-se que em sistemas fechados como centrífugas

ou SCR os teores de sólidos dos resíduos tratados estão entre 17 e 22% e acima de 20% para sistemas naturais abertos, podendo atingir valores entre 40 e 60% na fase de secagem.

Di Bernardo e Sabogal (2008) citam que o teor de sólidos mínimo de 20% é condição necessária para que os resíduos de ETA possam ser transportados até um aterro sanitário. Para a estabilidade geotécnica, o teor de sólidos deve ser de 15 a 25% e a tensão de cisalhamento acima de 20 a 25 kPa.

De acordo com Barroso (2007) muitas pesquisas utilizaram sistemas naturais de desaguamento, como exemplo, a ETA situada na região do Alto Tietê, onde os sistemas de recuperação de ALAF e as lagoas foram ineficientes na remoção do lodo, visto que no projeto não se levou em conta o clima e geologia da região. Esta área apresenta alta umidade o que inviabilizou a evaporação da água livre.

Em uma ETA na cidade de Rio Claro foram projetadas e construídas lagoas, cujo fundo era impermeável. O lodo então era disposto nessas lagoas e deixado em repouso, proporcionando a sedimentação das partículas, o sobrenadante era removido através de tubulações que funcionavam como vertedores. O grande problema desse sistema, também, foi na concepção do projeto, principalmente relativo à remoção do sobrenadante e formação de uma camada de água intermediária entre o fundo impermeável e a camada de lodo seco, quando da infiltração de água pluvial (BARROSO, 2007).

Apesar de apresentarem deficiências na questão operacional e no descarte dos sólidos após a remoção da água, os sistemas de leitos de drenagem estão obtendo sucesso.

Os protótipos desenvolvidos e aplicados nas ETAs de São Carlos e Rio Claro - SP, e em sistemas reais, como em Cardoso e Guairá apresentaram alto desempenho.

O leito de drenagem aplicado na ETA de São Carlos mostrou-se efetivo na remoção de metais, sólidos, cor e turbidez, 80 % do volume drenado obtiveram turbidez < 20 NTU (BARROSO, 2007).

Por isso os sistemas naturais são alternativas de desaguamento oportunas em locais onde as ETAS possuem espaços disponíveis. Outrossim, as águas excedentes podem ser recuperadas e voltarem ao sistema de tratamento. Porém, deve-se levar em conta o risco biológico, pois se a água bruta conter patógenos e metais, por exemplo, ela não poderá ser recuperada.

Para esta pesquisa não foram abordados os sistemas mecanizados, visto que estas técnicas/processos não são objetivos dela, portanto, será evidenciado os sistemas de desaguamento natural, principalmente os leitos de drenagem.

2.5.1 LEITOS DE DRENAGEM (LDS)

Desde o início do século XX foram utilizados sistemas denominados “leitos de secagem” para extração de água de diversos tipos de rejeitos e de resíduos provenientes de sistemas de tratamentos de água ou de esgoto, sem mudança considerável de sua estrutura física.

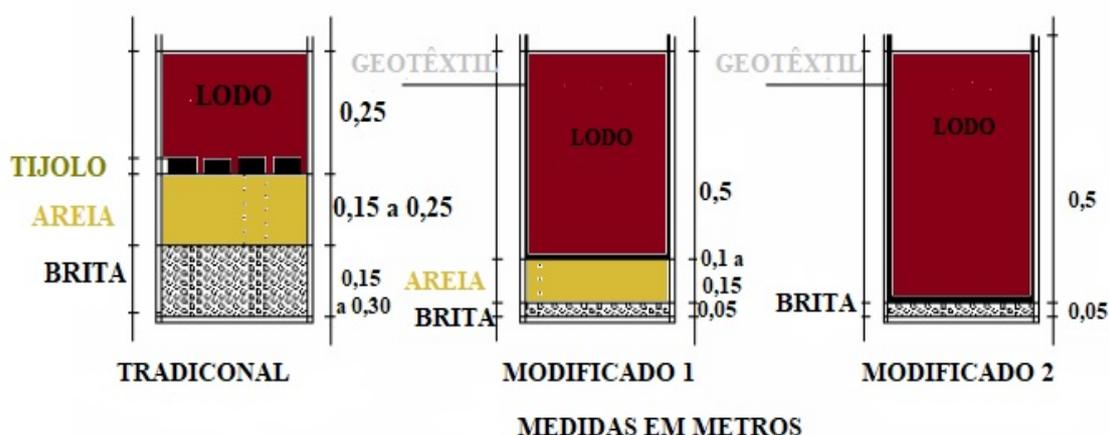
A partir dos estudos concebidos por Cordeiro (1993) foi possível a alteração desta estrutura com a introdução de geotêxtil sobre a camada filtrante do sistema que apresentou remoção mais efetiva da água livre dos lodos.

Foram utilizadas areias de construção (com dimensões grossas e finas) como meio filtrante. Para os testes realizados, as areias eram lavadas e os leitos testados com espessura de 5 e 10 cm. Os resultados obtidos evidenciaram que a areia e a espessura da camada filtrante não eram importantes na remoção de água livre.

Mais à frente, em estudo de Cordeiro (2001) no PROSAB 2 – Tema 4 foi apresentada a proposta denominada “leito modificado 2”, na qual não se utilizou mais a areia e o leito apresentou uma nova forma de concepção sendo constituído por uma camada de brita nº 1 com 5 cm e sobre ela houve a introdução de geotêxtil, utilizando alturas de camada de lodo de até 50 cm.

De acordo com a Figura 4 pode ser observada a evolução dos sistemas de leitos de secagem estudados por Cordeiro, desde o denominado “tradicional” até o “modificado 2”.

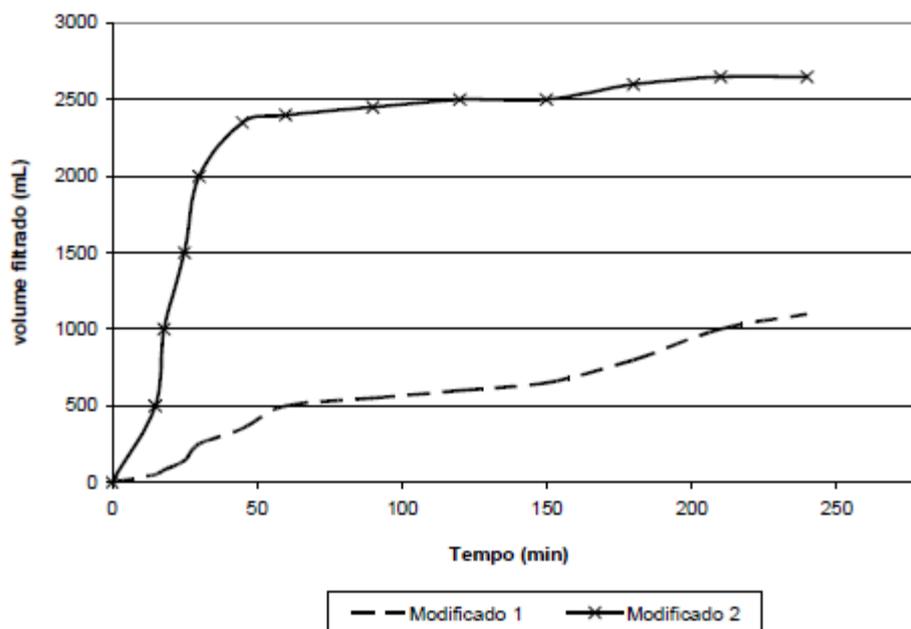
Figura 4 - Evolução dos leitos de secagem



Fonte: modificado de Cordeiro (2001).

Conforme, também é observado na Figura 5 os volumes filtrados comparando o sistema tradicional com o modificado 2 são diferentes, visto que em um mesmo tempo de drenagem (período), o volume do filtrado do modificado 2 é bem maior do que do tradicional, mostrando melhor eficiência do primeiro.

Figura 5 - Curvas de remoção de água filtrada de sistemas, modificado por Cordeiro 1993 e remodelado em 2000



Fonte: Cordeiro (2001).

Foi realizado por Cordeiro (2003) ainda dentro do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico- PROSAB, juntamente com Achon, pesquisas com os leitos de secagem modificados com resultados promissores, entre eles: diminuição do tempo de remoção da água livre e obtenção de drenado de boa qualidade, passível de reutilização ou recuperação. O leito de secagem modificado por Cordeiro (2001) recebeu a denominação de Leito de Drenagem- LD (caracterizado como um sistema de desaguamento natural aberto) sendo conforme as pesquisas, superiores aos leitos de secagem tradicionais e lagoas de lodo.

Achon *et al.*, (2003) estudaram o desaguamento de lodo na ETA de Rio Claro (SP, Brasil) com a utilização de geotêxtil sobre a camada de brita. Na Tabela 8 estão os resultados obtidos. Os autores concluíram que o tempo de secagem do lodo foi em média 7 dias, independente do volume de lodo descartado no leito, com redução do volume da ordem de 75% a 85%, possibilitando utilizar camadas de lodo com espessura entre 20 e 50 cm.

Tabela 8 - Desaguamento de lodo proveniente da descarga do decantador em leito de drenagem

Característica	Descarga do decantador	Filtrado no leito de drenagem
pH	7,92	8,04
Cor Aparente (uH)	-	28
Turbidez (uT)	-	2,7
DBO (mg/L)	-	7

DQO (mg/L)	-	32
Sólidos totais (mg/L)	64180	180

Fonte: Achon *et al.*, (2003).

Achon *et al.*, (2008) estudaram o desaguamento das descargas dos decantadores de duas ETAs de ciclo completo que utilizam os seguintes coagulantes: ETA A- sulfato de alumínio com teor de sólidos de 2,6% e ETA B- cloreto de polialumínio com teor de sólidos de 1,4%.

As Tabelas 9 e 10 mostram, respectivamente, os dados de ST do lodo ao longo do tempo e algumas características da água drenada. Em 7 dias foi obtido lodo desaguado com cerca de 30% de SST, porém, com 21 dias, foram atingidos valores da ordem de 80 a 90%. Apesar de não terem sido apresentadas características microbiológicas da água drenada, é possível inferir que a água recuperada poderia ser recirculada para o início da ETA.

Tabela 9 - Concentração de ST ao longo do tempo

Tempo (d)	Concentração de ST(%)	
	ETA A	ETA B
0	2,60	1,40
1	13,40	8,80
2	15,50	11,10
3	16,80	11,90
4	23,30	22,70
5	22,30	19,00
6	23,60	20,60
7	30,60	28,40
21	79,90	88,00

Fonte: Achon *et al.*, (2008).

Tabela 10 - Características da água drenada ao longo do tempo

Tempo (min)	Cor Aparente (uH)		Turbidez (uT)		pH	
	ETA A	ETA B	ETA A	ETA B	ETA A	ETA B
0	984	118	135	29,30	6,40	6,60
5	608	3	69	1,80	6,30	6,30
60	57	4	4,8	1,10	7,00	6,80

Fonte: Achon *et al.*, (2008).

Várias pesquisas foram concebidas com LD para desaguamento de lodo de ETA e apresentaram resultados promissores (Fontana, 2004; Borba, 2005; Barroso, 2007; Reis, 2011 e Cordeiro *et al.*, 2014).

Conforme foi destacado por Achon *et al.*, (2008), a concepção do leito de drenagem utilizando geotêxteis recomendada por Cordeiro (2001), dificultam os processos de colmatação no geotêxtil, além de facilitar a drenagem. Isto não foi observado em outros sistemas naturais (leitos de secagem tradicionais e lagoas de lodo).

Um ponto que necessita de estudos mais abrangentes é a utilização de diferentes geotêxteis, ou seja, tipos (tecidos e não-tecidos) e massa por área diferentes (maiores ou menores que 600g/ m²), pois a maioria dos estudos com LD empregam o geotêxtil não-tecido de massa por área de 600 g/m², que é o recomendado por Cordeiro (2001). As características deste geotêxtil encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 - Características do geotêxtil utilizada nos ensaios de desaguamento em Leito de Drenagem (LD)

Características	Unidades	Massa por área 600 g/m²
Espessura	mm	4,5
Porosidade	%	>90
Permeabilidade	cm/s	3x 10 ⁻¹
	normal	
Abertura de filtração	µm	60

Fonte: Cordeiro *et al.*, (2014).

O sucesso na utilização deste geotêxtil deve-se ao fato da eficiência no desaguamento, ou seja, maior volume e qualidade dos drenados, juntamente com a necessidade de lavagem dos geotêxteis após a retirada do lodo desaguado (CORDEIRO, 2001).

Em estudos posteriores Cordeiro *et al.*,(2014) destacaram que não era necessário realizar a limpeza dos geotêxteis, compreendendo ainda mais o uso deles como camadas filtrantes cada vez mais positivo e promissor, podendo aumentar a resistência e durabilidade deles, possibilitando lavagens sucessivas sem danificar o elemento filtrante.

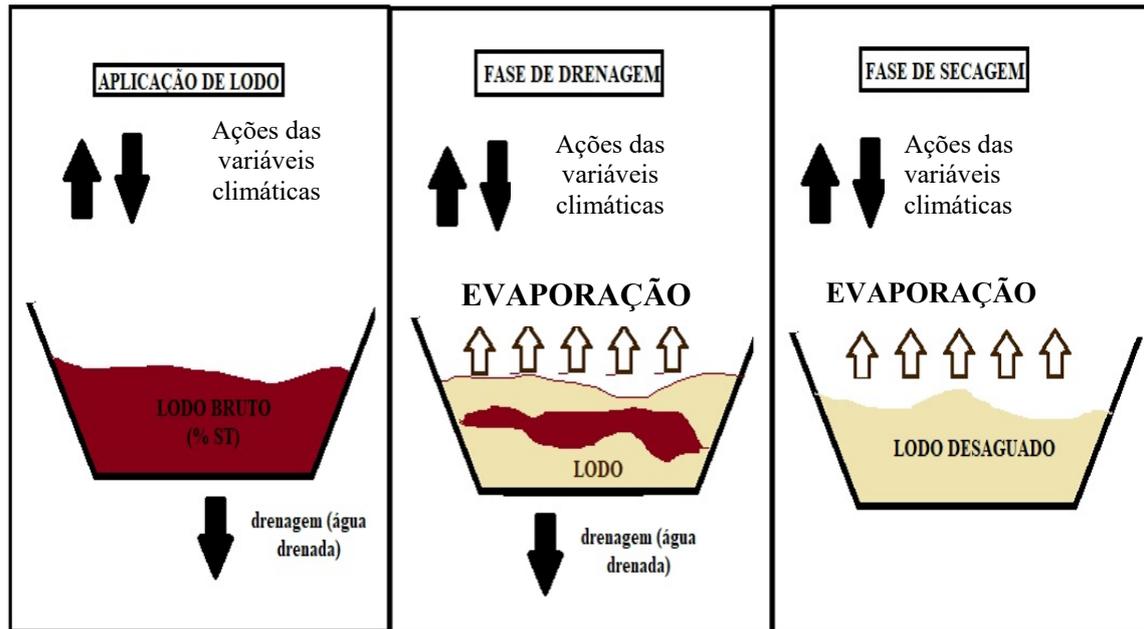
Como resultados da pesquisa realizada por Barroso (2007) com a utilização de LD em escala de bancada para desaguamento de lodo de ETA, foram definidas duas fases distintas. Na Tabela 12 encontram-se as características destas fases e na Figura 6 as ilustrações, definindo a fase de drenagem e secagem.

Tabela 12- Fases do desaguamento de lodo em sistemas de LD

LD	
Fase de drenagem	Fase de secagem
- ocorrência da drenagem de água livre através da utilização do geotêxtil não-tecido como filtro; -secagem por evaporação; -reduzida influência das variáveis climáticas.	-extinção da drenagem de água livre, a não ser quando ocorrem precipitações; -secagem predominante por evaporação com influência total das variáveis climáticas.

Fonte: modificado de Barroso (2007).

Figura 6 - Fases do desaguamento de lodo de ETA em Leito de Drenagem, segundo Barroso (2007)



Fonte: modificado de Barroso (2007).

Os resultados referentes à qualidade da água drenada dos estudos realizados por Silveira *et al.*, (2015) utilizando o LD em escala de bancada foram sistematizados e estabeleceu-se duas condições de enquadramento (I e II) e uma condição de reaproveitamento (III). Um resumo destas condições de enquadramento encontra-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Condições de enquadramento do drenados

Estudo de Silveira <i>et al.</i>, (2015)	
<u>Condição I</u>	-Drenados com valores de turbidez < 40 uT; - possibilidade de enquadramento da água drenada em corpos de água doce Classe I (Resolução Conama 357/05).
<u>Condição II</u>	-Drenados com valores de turbidez < 100 uT; - possibilidade de enquadramento da água drenada em corpos de água doce Classe II (Resolução Conama 357/05).
<u>Condição III</u>	-Drenados com valores de turbidez < 10 uT; - possibilidade de reaproveitamento da água drenada dentro da própria ETA.

Fonte: Silveira *et al.*, (2015).

Concluíram ainda que o desaguamento de lodo de decantadores de ETA por LD com geotêxteis é um processo natural de desaguamento eficiente e passível de aplicação em ETA de pequeno porte, além de econômico, devido ao baixo consumo de energia ou adição de produtos químicos. Como recomendações, propõe: a avaliação dos parâmetros de projeto, a Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS), considerando as variações no teor de sólidos (concentração de sólidos) inicial do lodo, devido à grande variação encontrada no lodo gerado nas ETAs em escala real.

Evidencia-se que a concentração de sólidos varia bastante de um sistema para o outro podendo alcançar teores de sólidos totais até 3%, sendo que em alguns casos, dependendo da forma e intervalo de remoção do lodo, esse teor pode ser abaixo de 1% (FONTANA, 2004).

Apesar da existência de uma variedade de trabalhos sobre utilização de lodo de ETA aplicado aos LD, os conhecimentos ainda são insuficientes para caracterizar perfeitamente a tecnologia do LD e a utilização de polímeros como condicionante com vistas à eficiência e qualidade de desaguamento. Outrossim, estudar outros tipos de geotêxteis aplicados aos sistemas de LD também é de grande valia.

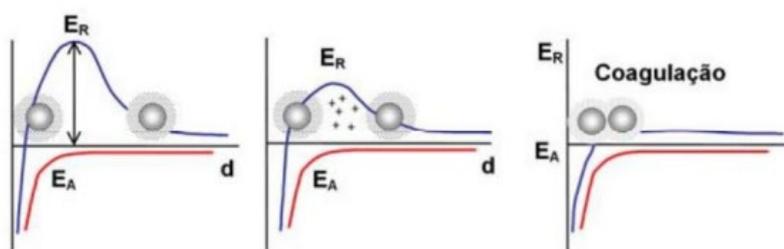
2.6 Condicionamento químico do lodo e aplicações no desaguamento

Conforme afirma Silva (2017) polímeros sintéticos e naturais têm sido usados como auxiliares de coagulação, floculação e filtração nas ETAs.

O condicionamento é um processo composto por uma etapa de coagulação e outra de floculação. A coagulação tem por objetivo “desestabilizar as partículas por meio da diminuição das forças eletrostáticas de repulsão, conforme Figura 7. Isto ocorre por intermédio da compressão da dupla camada elétrica que envolve superficialmente

cada partícula” (GONÇALVES *et al.*, 2001, p. 58), facilitando sua aproximação. A floculação permite a aglomeração dos coloides e dos sólidos finos por meio de baixos gradientes de agitação. O tratamento químico consiste na adição de sais de alumínio e ferro ou polímeros orgânicos junto ao lodo (BITTON, 2001), ocorrendo então a “desestabilização das partículas do lodo com formação de flocos com dimensões maiores” (MIKI *et al.*, 2006, p. 41).

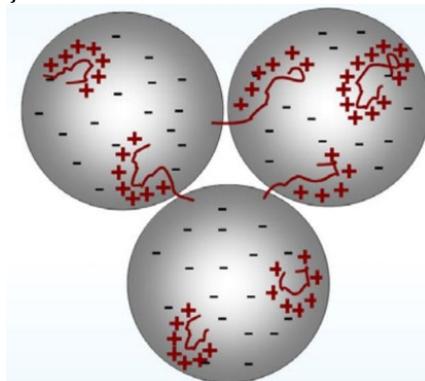
Figura 7 - Mecanismo simplificado de Coagulação



E_R = Energia de repulsão; E_A = Energia de atração.
 Fonte: Oliveira e Rubio (2011).

Luz *et al.*, (2010) define floculação como a ação de um polímero, necessariamente solúvel em água, denominado floculante, que promove a agregação de partículas finas em forma de flocos. Segundo Chaves (2013), existem dois mecanismos de floculação para os polímeros. O primeiro mecanismo ocorre com um polímero de cadeia curta com carga elétrica contrária à carga da partícula, quando o floculante adsorve de forma plana em uma área restrita da superfície, neutralizando as cargas dessa área, a partícula irá possuir uma área com uma carga cercada por cargas de sinal oposto. Deste modo uma área positiva de uma partícula poderá atrair uma área negativa de outra partícula e vice-versa, formando os flocos. Na Figura 8 é possível observar a adsorção de forma plana de um polímero com carga positiva em partículas com cargas negativas.

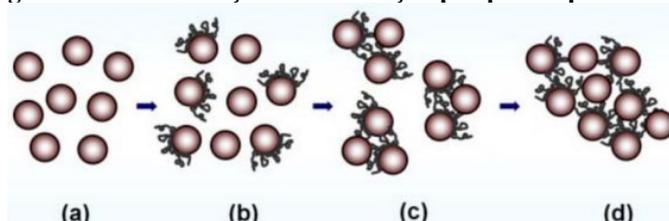
Figura 8 - Demonstração do Floculante adsorvido de forma plana nas partículas



Fonte: Oliveira e Rubio (2011).

Citado por Chaves (2013), outro mecanismo é o da formação de pontes, onde se utiliza polímeros de cadeias maiores, o esquema de formação de pontes é exibido na Figura 9. Esses polímeros se adsorvem apenas em alguns pontos, deixando o resto da cadeia livre para adsorver em outra partícula. Quanto maior a cadeia do polímero maior será o floco formado, porém quanto maior o floco maior retenção de água no floco.

Figura 9 - Demonstração de Floculação por pontes poliméricas



Fonte: Oliveira e Rubio(2011, p.16)

Oliveira *et al.*, (2004) citam que para a escolha do floculante deve-se considerar alguns fatores do reagente: tamanho da cadeia molecular, natureza iônica do polímero, densidade iônica e as características químicas dos grupos ativos da molécula. Deve-se também salientar que cada operação de separação sólido/líquido necessita de um tipo diferente de floco, por exemplo no espessamento é necessário flocos grandes enquanto na filtração o floco deve ser compacto, deste modo, o tipo de floco desejado apresenta um papel muito importante na hora da escolha do floculante.

A eficiência dos mecanismos de floculação é controlada por alguns fatores, tais como: agitação do sistema; porcentagem de sólidos; pH e temperatura. A agitação do sistema está ligada diretamente à chance da colisão entre as partículas, com a quebra de flocos e com a sedimentação do sistema. Ou seja, deve-se encontrar um valor ideal de agitação onde seja possível atingir o máximo de colisões, prevenindo uma sedimentação e com um valor mínimo de quebra de flocos.

A porcentagem de sólidos também é relacionada à colisão das partículas, sendo que quanto maior a porcentagem de sólidos maior o contato entre partículas e mais rápido será a interação das partículas com floculante.

Um dos parâmetros mais influentes na eficiência é o pH da solução, porque o floculante reage com as cargas da superfície da partícula e essas cargas variam de acordo com o solvente que é utilizado. Os principais íons capazes de reagir com as cargas elétricas da superfície, assim determinando a mesma, são os íons de hidrogênio (H^+) e íons hidroxila (OH^-). Já o aumento da temperatura traz uma maior colisão entre as partículas assim melhorando a adsorção do floculante.

Sendo o pH do resíduo elevado (acima de 8,5), naturalmente ou por motivos de condicionamento com cal, um polímero aniônico é mais aconselhável, se um lodo apresenta pH um pouco acima ou abaixo do neutro a utilização de um polímero catiônico deve produzir melhores resultados, os não-iônicos e aniônicos funcionam satisfatoriamente em valores de pH entre 6,5 e 8,5 (REALI, 1999; SPELLMAN, 1997).

Ademais, a adição de polímeros para melhorar a eficácia no condicionamento do lodo, assim como, da faixa em que se pode encontrar as melhores dosagens dos mesmos, qual carga dos polímeros devem ser testadas, estimativas de custos e a viabilidade de implantação do processo de condicionamento dependem de características intrínsecas do lodo, como: a qualidade da água bruta; os reagentes utilizados, os tipos de operações e processos unitários existentes na ETA (MORITA, 2019; METCALF E EDDY 1991).

Outros elementos importantes são o peso molecular dos polímeros, sendo que os polímeros de alto peso molecular, (conforme os que foram selecionados nesta pesquisa), são conhecidos por conferirem ao lodo melhores características de desaguamento (GRANDIN, 1992; NOVAK, O'BRIEN, 1975; WANG, 1996). Somados ao pH e alcalinidade que exercem papel fundamental na cinética de floculação, por serem responsáveis pelas cargas superficiais das partículas presentes no lodo (WPCF, 1988, apud Miki, 1998).

Segundo Novak e O'Brien (1975), o condicionamento de lodos pode diminuir o tempo de desaguamento, os custos com equipamentos e os custos operacionais.

Vertematti (2015) apresenta um resumo dos tipos de coagulantes e floculantes mais utilizados e o seu funcionamento quando em contato com sólidos em suspensão. Na Tabela 14 é apresentado um resumo destes principais condicionantes químicos.

Tabela 14 - Resumo dos tipos de polímeros mais utilizados

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 em suspensão e incremento do tamanho dos flocos formado (via formação de pontes). Usualmente utilizado no tratamento de lamas orgânicas.
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); Cloreto de	Cátions polivalentes (Al ³⁺ , Fe ³⁺ , Fe ²⁺ , etc)

polialumínio; Cloreto Férrico (FeCl ₃); Sulfato ferroso (FeSO ₄)	neutralizam as cargas elétricas das partículas suspensas e os hidróxidos metálicos ao adsorverem as partículas, geram uma floculação parcial
---	--

Fonte: adaptado de Vertematti, 2015.

Embora Queiroz (2019) cite que a maioria das tecnologias de desaguamento de resíduo de ETA emprega condicionamento químico em alguma parte do processo, com teor de polímeros variando de 0,5 até 6,0 gramas de polímero por quilo de sólidos secos, estudos sobre Leitões de drenagem realizados por Fontana (2004) e Reis (2011) indicaram efetividade do emprego de LD em desaguamentos de lodos de ETA sem a necessidade de condicionamento com polímeros. Tais estudos foram apresentados na sessão sobre leitões de drenagem em escala real.

Em muitos outros trabalhos (MINATEL, 2021; CORDEIRO *et al.*, 2014; SANTOS, 2012; SILVEIRA E KURODA, 2011; 2013; 2015; ACHON *et al.*, 2008; BORBA, 2005) não foram utilizados produtos químicos no condicionamento do lodo de ETA antes dos experimentos, pois os autores destacam que na própria origem do resíduo tais compostos se encontram em abundância, assim, não viram necessidade desta aplicação. Outrossim, esses estudos mostraram resultados satisfatórios no desaguamento de lodo utilizando sistemas de LD, seja no sucesso do sistema ou na qualidade do filtrado final.

De acordo com Stoltz *et al.*, (2019) utilizar geotêxteis para filtrar lodo argiloso ou suspensões de partículas finas na água é mais complexo que o utilizado para filtrar suspensões de solos granulares, sendo necessário a adição de flocculantes para adiar a formação de um filtro com permeabilidade baixa e para manter o preenchimento adequado do recipiente por partículas sólidas (Moo-Young *et al.*, 2002; Muthukumaran e Ilamparuthi, 2006 ; Lawson, 2006; Delmas, 2007; Satyamurthy e Bhatia, 2009).

Em sistemas de confinamento de resíduos com geotêxteis (SCR) a utilização de polímeros anterior a sua aplicação em sistemas de desaguamento é necessária. (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011 apud Silveira 2012). Vários estudos (por exemplo, ARDILA *et al.*, 2020; SCALIONI *et al.*, 2019; LIMA, 2016; SATYAMURTHY; BHATIA, 2009; KOERNER; KOERNER, 2010) mostraram que polímeros com natureza química de poli(acrilamida) catiônica e aniônica podem ser usados com sucesso em projetos de desaguamento neste tipo de sistemas.

Barroso (2007) utilizou polímeros aniônicos de elevada massa molecular para realização de testes de condicionamento químico aplicados a dois lodos de ETA; o primeiro que utiliza sulfato de alumínio como coagulante e o segundo com utilização de

policloreto de alumínio. Os resultados dos ensaios realizados com e sem adição de polímeros mostraram que a adição de condicionantes químicos não representou melhora significativa para o desaguamento em sistemas naturais e por isso não foram adicionados polímeros nesses ensaios.

Porém, Mortara (2011) avaliou o tratamento de lodo de ETE, no qual é utilizado o sulfato de alumínio como agente coagulante, aplicado ao sistema de leito de drenagem utilizando polímeros catiônicos como pré-tratamento, com vistas ao aumento da eficiência.

O autor observou que o tratamento prévio com polímeros catiônicos possibilitou menor tempo de drenagem, produziu efluente drenado de melhor qualidade, mas pouco interferiu no tempo de secagem. Além de determinar o polímero e sua dosagem ideal, destacou que o excesso desse reagente reduz a vida útil do geotêxtil, em razão do mesmo promover maior viscosidade da água residuária e consequentemente favorecer a colmatação do geotêxtil.

A intenção em adicionar polímeros no processo de desaguamento utilizando SCR tem-se como objetivo a formação de pontes químicas entre partículas em suspensão para formação de grumos ou flocos, o que permite que a retenção seja mais eficiente e também diminui o risco de colmatação do geotêxtil pelo arraste de partículas finas. Apesar da expectativa de aumento da eficiência do processo com a utilização de polímeros é importante que sejam realizados ensaios para verificação da reação deste tipo de polímero com o material a ser desaguado.

Guimarães e Nour (2001) destacam que a utilização de SCR como etapa primária com uso de polímero, constitui processo físico-químico onde ocorrem dois fenômenos: reações de hidrólise do agente coagulante, produzindo partículas de carga positiva e, adsorção com choques de partículas com as impurezas, que apresentam cargas negativas com a formação de partículas de maior volume e maior densidade.

Além disso, o processo de coagulação permite a transformação de grande parte do material coloidal e dissolvido em fração particulada a qual é mais eficientemente removida no processo de filtração, de modo que os fenômenos de colmatação são minimizados (VIDAL e CAMPOS, 2009).

Gharaibeh (2009) relata que, a aplicação de polímeros no desaguamento, aumenta consideravelmente a taxa de deságue. Os polímeros podem ser classificados de acordo com a sua carga elétrica em catiônicos, aniônicos, não-iônicos e anfóteros e, quanto a sua origem: sintética ou natural.

Barroso (2007) destaca duas vantagens no uso específico de polímeros sintéticos que se aplicam ao tratamento de resíduos em relação aos sais de ferro e alumínio e a cal.

São elas: (i) redução do volume do resíduo gerado; (ii) maior facilidade de desaguamento do resíduo gerado.

O sistema de preparo de polímero tem por finalidade produzir, através de equipamentos microprocessados, a concentração necessária da solução de polímero para ser adicionada ao lodo digerido que alimenta o sistema de desaguamento (SILVA E SEGATO, 2002).

Os polímeros catiônicos possuem alto poder de floculação, sendo utilizados em vários pontos de um processo de clarificação de água e efluentes. As suas vantagens relacionam-se com a alta performance na forma de pó ou em emulsão e a otimização nas dosagens. Já, os polímeros aniônicos são usualmente utilizados em lodos químicos (VON SPERLING *et al.*, 2001).

Os polímeros não aniônicos são amplamente comercializados em sistemas para neutralização parcial ou total de particulados em operações de filtragem, na operação de remoção de lodo inorgânico de sistemas de tratamento primário, obtendo grandes aumentos na eficiência de remoção de sólidos dos decantadores, em sistemas de tratamento de água para consumo humano, sedimentadores, trabalhando em conjunto com polieletrólitos catiônicos em estações de tratamento de efluentes, entre outros.

Existem polímeros convencionais conhecidos como polieletrólitos (tipo poli(acrilamidas)), porém, uma nova família de polímeros tem ganhado espaço no mercado dos floculantes: são as moléculas com estrutura única (UMA – *unique molecular architecture*), como mostrado no trabalho de WEIR E MOODY (2003) e PEARSE (2003). Segundo os autores, o ganho na eficiência de floculação deve-se à maior facilidade na dispersão das moléculas do polímero na polpa e à maior resistência do floco formado.

Os floculantes à base de polímeros naturais, como quitosana e ácido húmico, também têm apresentado crescente aplicação na operação de clarificação para recuperação de água de processo devido à maior degradabilidade no meio ambiente (LOAYZA, 2015; FRANÇA *et al.*, 2015).

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 uma redução no tempo de desaguamento e diminuição da turbidez do efluente.

Estudos realizados por Miki *et al.*, (2006) provaram que a utilização de polímeros na etapa de condicionamento de lodo de ETE possibilitou a produção de tortas com teor de sólidos superior a 30%, com a aplicação de dosagem de polímero e

cloreto férrico de 4,8 kg/t e 63 kg/t, respectivamente (dosagens em relação à massa seca original de lodo). Com base em tais resultados, estimou-se que a utilização desse tipo de condicionamento poderia resultar em significativa redução dos custos operacionais referentes ao consumo de produtos químicos e transporte do lodo.

Um estudo realizado por Kerber (2008), com lodo oriundo de estação de tratamento de água, comparou o efluente após adensamento no SCR e por centrifugação. O efluente do SCR apresentou grande redução no parâmetro sólidos sedimentáveis com concentrações inferiores a 1mL/L, enquanto o efluente da centrifugação apresentou concentrações em torno de 15 mL/L. Neste estudo foi utilizado um geotecido de polipropileno de alta resistência, nas dimensões de 6 x 12 m, com capacidade total de 72 m³, assentado em berço de brita e geotêxtil. Percebeu-se que a qualidade da água percolada do SCR apresentou melhores resultados nos parâmetros: cor, turbidez, Fe, Al, DQO e DBO (demanda bioquímica de oxigênio), fato este devido ao tipo do processo passar por uma filtração composta por uma camada de brita e outra de geotêxtil. Ao longo do processo, observou-se também um acréscimo nas concentrações de Mn, Fe, e Al na água percolada do SCR devido ao acúmulo gradativo de lodo adensado no mesmo. Concluiu ainda que obtiveram-se reduções no custo de energia elétrica, por seu desaguamento ser natural, ou seja, sem consumo de energia; no custo da mão-de-obra (manutenção) por se tratar de um sistema simplificado que não envolve o funcionamento de equipamento centrifugador e no consumo de polímero para coagulação e secagem do lodo, que reduziu aproximadamente 60% em relação ao processo centrifugado, mostrando-se uma alternativa mais eficiente e conseqüentemente mais econômica. Porém, faz-se necessários estudos sobre a destinação final de lodo.

Pieper (2008) também avaliou o lodo de ETA e evidenciou que SCR utilizando geotêxtil não-tecido representam uma alternativa tecnológica para a redução do teor de umidade dos resíduos, apresentando um melhor desempenho em relação às técnicas convencionais. Pode-se também utilizá-la em paralelo com outras técnicas já existentes para a otimização do processo de desaguamento. Ressalta-se que a correta operação da tecnologia garante a eficiência da drenagem, sendo, então, necessária a adição de polímeros como agentes coagulantes, de forma a promover a separação da fase líquida da fase sólida. Observou-se que os resíduos condicionados ao reduzirem o teor de umidade passam a concentrar alguns componentes químicos tais como: sílica, nitrogênio e alumínio, que necessitam de estudos mais abrangentes para a sua disposição final correta.

No desaguamento com uso de geotêxtil não-tecido em lodo de estação de tratamento de água, Costa *et al.*, (2012) apresentaram uma experiência relevante em

relação à economia e ao enquadramento das variáveis nos padrões estabelecidos pela legislação em Petrópolis. Por meio de SCR conseguiram chegar à reutilização de 85% do total de 7740 litros de água que eram utilizados para lavagem de filtros, uma porcentagem significativa para uma ETA de vazão de 5 L/s. Este estudo mostrou que o uso de geotêxtil não-tecido no desaguamento do lodo de ETA apresentou eficiência com remoção de até 99% dos contaminantes e quanto a clarificação dos efluentes houve excelente desempenho.

Conforme os estudos descritos, a maioria dos trabalhos encontrados na literatura utilizam o condicionamento de lodos, sejam eles de ETA ou de ETE anteriormente a aplicação do resíduo em SCR, com resultados favoráveis. Porém, não foram encontrados na literatura estudos utilizando o emprego de polímeros nos LDs aplicados à lodos de ETA, ressaltando o ineditismo desta pesquisa.

2.6.1 ENSAIO DE CONE GEOTÊXTIL

A escolha do polímero mais adequado para as características do lodo avaliado deve ser feita por meio de testes em laboratório, considerando o tipo de polímero, a concentração da solução polimérica e a sua dosagem por volume de lodo (Guañes, 2009; Maurer *et al.*, 2012).

Neste contexto, conforme destaca Mortara (2011) e Guimarães *et al.*, (2014) uma maneira rápida e econômica de analisar o condicionante e a dosagem a serem empregados é o método do ensaio de cone (metodologia encontrada em Lawson (2008). Santos (2012) destaca que estes testes podem ser realizados em laboratório ou no campo.

Resumidamente, o ensaio é bem simples. A metodologia consiste na filtração de uma amostra de lodo contendo um condicionador com concentração e dosagem em análise (Lawson, 2008). Após o tempo de filtração, realizam-se análises tanto do lodo desaguado sobre o cone quanto do filtrado coletado.

Embora seja uma metodologia empírica, apresenta uma visão geral da porcentagem final de sólidos, redução de volume e qualidade final do efluente, por meio da análise da turbidez do percolado durante o ensaio (Guimarães e Urashima, 2013).

A revisão bibliográfica atual (SCALIONI *et al.*, 2019; URASHIMA *et al.*, 2020; URASHIMA, 2020 e ARDILA *et al.*, 2020) mostram que apesar do teste de cone ser aplicado com resultados promissores para uma análise prévia da necessidade de condicionamento químico do lodo, ele é usualmente utilizado para sistemas de confinamento de resíduos (SCR).

Em relação à nomenclatura que recebe este tipo de sistemas, ainda não se chegou a um consenso. No Manual Brasileiro de Geossintéticos, Vertematti (2015) denomina os sistemas fechados de geotêxtil como formas têxteis, além de diferenciá-los em função da aplicação e capacidade do sistema.

O termo *Sistemas Fechados em Geotêxtil* foi empregado pela primeira vez no trabalho de Tominaga (2010). Ainda assim nas recomendações da IGS Brasil (IGS BR 004, 2014) apareceu o termo *Sistemas de Confinamento de Resíduos* (SCR), que tem sido empregado em alguns trabalhos (MÜLLER, 2018; MÜLLER; VIDAL; GUANAES, 2018; URASHIMA *et al.*, 2020) e foi utilizada para esta pesquisa.

Outros autores (SATYAMURTHY; BHATIA, 2009; DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012; MAURER *et al.*, 2012; KHACHAN *et al.*, 2014) relatam que a determinação da concentração e dosagem ótima do polímero podem ser feitas tanto por meio do ensaio de cone como por ensaio de *Jart Test* (teste dos jarros), este último permite a avaliação de processos de floculação em geral, e está padronizado para água na norma ASTM D2035 (ASTM, 2019).

Mortara (2011) na sua pesquisa sobre a utilização de LD no desaguamento de lodos anaeróbicos utilizou 18 polímeros das marcas CIBA, ASHLAND, SNF e KEMIRA e 5 geotêxteis, (3 tecidos e 2 não tecidos das empresas MACCAFERRI, HUESKER, BIDIM e PROPEX), com o intuito de determinar o polímero e o geotêxtil que seriam utilizados nos testes em escala piloto.

Os polímeros foram preparados no *Jart Test*, com diluições que variaram de 1 a 4 gramas do produto por litro para manter a razão volumétrica de dosagem de 0,04 e 0,2. A quantidade desejada de polímero era adicionada de forma cuidadosa a 500 ml de água já em mistura no equipamento. A rotação da hélice da mistura na diluição de todos os polímeros foi fixada em 250 rpm, gerando gradiente hidráulico de cerca de 1500 s^{-1} . Os polímeros foram diluídos e adicionados ao lodo no *Jart Test*, em jarros de 1L de volume. Com o auxílio do funil de Buchner, o geotêxtil foi preso em formato de funil, o volume drenado foi de 200 mL. A melhor dose de cada polímero seria a menor dose que proporcionasse a coleta dos 50 mL no em um tempo inferior a 5 segundos.

Os resultados dos estudos mostraram que:

- Polímeros catiônicos testados reduziram o tempo de drenagem nos ensaios laboratoriais para dosagens iguais ou superiores a 1 g de polímero por kg de sólidos secos no lodo;
- Geotêxteis mais indicados foram os tecidos por apresentarem maior facilidade de limpeza e menor desgaste em operações sucessivas de remoção de lodo desaguado;

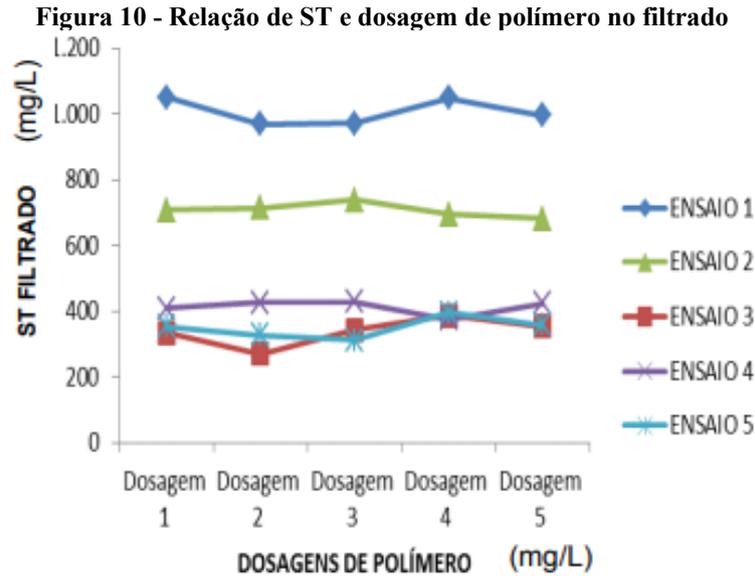
- Doses de polímero ≥ 2 g/kg ST aumentaram significativamente a velocidade inicial de drenagem, porém, não foi verificada remoção de umidade do lodo ao longo do período de secagem;
- Doses de polímero ≥ 2 g/kg ST promoveram maior facilidade na remoção da torta do leito de drenagem e na limpeza dos geotêxteis;
- Para escala piloto a dosagem de 2 g/kg ST foi a que apresentou melhor resultado para os LD;
- Há um evidente potencial de melhoria das características de drenagem do lodo com a adição de doses realmente reduzidas de condicionante.

Souza (2016) estudou o lodo proveniente da ETE Vila da Barca – PA utilizando SCR do tipo MACTUBE de 0,35 mm de abertura de filtração, sendo adicionados em cada um deles um volume fixo de lodo, a fim de variar e testar diferentes concentrações deste material e avaliar a melhor condição de desaguamento.

Ele estudou o condicionamento do lodo em equipamento *Jart Test* com misturador (agitador) rápido. O lodo utilizado foi coletado nas tubulações de descarga do reator UASB no leito de secagem, constituídos pelo lodo acumulado no fundo do reator, tendo como características de lodo pré-adensado.

Os polímeros utilizados foram catiônicos, aniônicos e não-iônicos com concentração de 0,1%. Os ensaios de desaguamento foram realizados em escala de bancada no *Jart Test*, com rotação média de 150 rpm com cloreto de polialumínio e polímero catiônico na concentração de 0,1%.

De acordo com a dosagem de polímero utilizada no condicionamento, foram obtidas variações dos sólidos totais nos filtrados, como mostrado na Figura 10. Os sólidos totais (ST) foram 491 mg/L, 466 mg/L e 540 mg/L (nos filtrados 1, 2 e 3 respectivamente).



Fonte: Souza, 2016.

Foram observadas oscilações nos valores de ST em função da dosagem, sendo que a maioria dos filtrados apresentou um aumento de concentração na variável sólido na dosagem 4; apenas o filtrado do segundo ensaio mostrou uma queda nesta concentração. Isto confirmou que para uma elevada concentração inicial de lodo bruto (30.133 mg/L) a reação com a dosagem de 241 mg/L de solução de polímero não foi eficiente para a redução dos sólidos totais no filtrado, alterando a qualidade final deste.

Foi utilizado 95 mg/L de polímero e 8 mg/L de PAC com concentração de lodo de 24.106 mg/L esse resultado trouxe qualidade do filtrado satisfatória e torta com alta concentração de sólidos e baixo teor de umidade, com eficiência de desaguamento de 90%.

Scalioni *et al.*, (2019) e Urashima *et al.*, (2020) utilizaram ensaios de cone para avaliar o condicionamento de lodos provindos da descarga de dois decantadores e da ALAF de uma ETA na cidade de Elói Mendes, Minas Gerais, Brasil, que trabalha com ciclo completo e faz uso de sulfato de alumínio no processo de coagulação, seguindo metodologia proposta por Lawson (2008). Foram avaliados polímeros granulares tipo aniônicos e catiônico nas concentrações de 0,10 e 0,20%, com dosagens iguais a 10, 20 e 40 mL/L, fazendo-se réplicas visando a representatividade do ensaio.

Os resultados obtidos nos ensaios de cone, com os cinco condicionadores em diferentes concentrações e dosagens, são mostrados na Tabela 15. O polímero que apresentou melhor desempenho, com menor turbidez e alto volume de percolado, foi o A130 na concentração de 0,2% e dosagem de 40mL/L. Entretanto em busca de um

melhor custo benefício, foi escolhido fazer seu uso, porém na concentração de 0,1% e com dosagem de 20mL/L.

Tabela 15 - Resultados dos polímeros testados nos ensaios de cone

Referência comercial	Classificação	C (%)	D (mL/L)	VF (mL)	T (NTU)
CH-494	Catiônico	0,1	10	200,00	34,75
			20	295,00	20,40
			40	289,33	20,00
		0,2	10	295,67	19,07
			20	333,33	15,80
			40	317,00	12,73
A-100	Aniônico	0,1	10	-	-
			20	309,67	17,49
			40	351,50	14,07
A-110	Aniônico	0,1	10	-	-
			20	300,00	13,92
			40	345,00	12,21
A-130	Aniônico	0,1	10	276,67	29,28
			20	327,67	11,70
			40	355,67	9,30
		0,2	10	325,67	24,00
			20	341,00	8,42
			40	352,00	7,11
A-150	Aniônico	0,1	10	sem	-
			20	floculação	49,27
			40	279,00	10,71
				349,67	

Onde P: Polímero, C: Concentração, D: Dosagem, VF: Volume filtrado médio, T: Turbidez.

Fonte: modificado de Urashima *et al.*, (2020).

Os autores citam que a eficácia do condicionamento químico por ensaios de cone é vista como promissora, levando-se em conta os grandes volumes destes resíduos e as dificuldades do desaguamento em SCR devido sua resistência à filtração.

Em estudo de Urashima (2020) que comparou SCR com LD foram utilizados ensaios de cone, conforme a metodologia descrita na literatura. Foram testados polímeros (quatro catiônicos e um aniônico) preparados na concentração de 0,2% e dosagens de 20mL/L e 30mL/L com a finalidade de condicionamento do lodo. Foi utilizada uma amostra única de lodo provinda dos decantadores da ETA Modular da Universidade Federal de Lavras (UFLA), com teor de sólidos inicial de 7,4%.

Para confecção dos protótipos de LD e SCR foi empregado um tipo de geotêxtil tecido de polipropileno, com alta permeabilidade e pequena abertura de filtração. Os protótipos e suas réplicas receberam quatro recargas de 10 L de lodo a cada trinta minutos e posteriormente ficaram expostos às intempéries por 420 horas. Como resultados os autores destacam que inicialmente, ambos os sistemas apresentaram valores similares de turbidez e volume de percolado; entretanto, quando expostos em campo devido à ação das intempéries, principalmente precipitação, no final das 420

horas o teor de sólidos que inicialmente era de 7,4% passou para 66,4% no SCR e 32,4% no LD.

Ardila *et al.*, (2020) realizaram estudos laboratoriais e análises estatísticas a fim de avaliar o desaguamento em SCR utilizando lodo da ETA Jardim Bela Vista no município de Nova Odessa-SP. Esta ETA é do tipo convencional e emprega cloreto de polialumínio no processo de coagulação.

O lodo apresentou as seguintes características: ST de 3,8%, SF de 41,20% e SV de 58,80%, distribuição granulométrica com 0,5% de argila, 16,5% de silte e 83% de areia e teor de sólidos de 3,8%. Foram utilizados geotêxteis não - tecidos de massa por unidade de área 612 e 895 g/m² e um tecido de 414 g/m².

A pesquisa foi dividida em duas etapas. Na 1ª etapa foram realizados ensaios de desaguamento em cone com a finalidade de definir o polímero e avaliar a influência das variáveis ST inicial e dosagem de polímero no desaguamento nos diferentes tipos de geotêxteis selecionados para serem utilizados nos ensaios de desaguamento com bolsa fechada (2ª etapa).

Os autores expuseram que para avaliação da utilização de condicionadores químicos, primeiramente deve-se selecionar a dosagem adequada de cada polímero. Para isso, deve-se ter em conta as instruções dos fabricantes contidas nos catálogos dos produtos. No seu estudo os autores consideraram além dessas instruções, que não foram demasiadamente trabalhosas, referências encontradas em trabalhos anteriores (GUANAES *et al.*, 2009; GUIMARÃES; URASHIMA; VIDAL, 2011, 2014; GUIMARÃES; URASHIMA, 2013; KOERNER; KOERNER; HUANG, 2016; AVANCINI, 2017; MOREIRA, 2017; SILVA, 2017; URASHIMA *et al.*, 2018a, 2018b). Foram utilizadas três concentrações diferentes, de 0,1%, 0,25% e 0,5%, e uma dosagem única de 20 mL/L, sendo testados 10 polímeros (aniônicos, catiônicos e não iônicos) e os dois geotêxteis não-tecidos analisando o volume percolado e a turbidez do filtrado.

Esses mesmos ensaios foram realizados em *Jart Test* (com gradiente de mistura de 200 s⁻¹ e tempo de mistura correspondente a 60 s), apenas variando as dosagens dos polímeros.

Como resultados foram obtidos percolados com valores de turbidez que atenderam à normativa de lançamento de efluentes em corpos hídricos Classe 2 para todos os geotêxteis avaliados, assim como teores de sólidos superiores aos obtidos com outras tecnologias de desaguamento de resíduos, que são atualmente empregadas nas ETAs. O geotêxtil do tipo não tecido com massa por área de 600 g/m² com dosagem de 1,7 mg Pol/gST, seguido da dosagem de 0,8 mgPol/gST foram os que apresentaram o melhor

desempenho no desaguamento, tendo em vista os resultados da qualidade dos percolados e a evolução dos teores de sólidos obtidos, viabilizando assim o emprego deste tipo de material para a aplicação de SCR.

O melhor resultado foi para o polímero C8396. Aplicado aos ensaios de bolsa fechada de geotêxtil, as porcentagens de sólidos inicial foi de 0,7 e 0,88 e as porcentagens de sólidos ao final do monitoramento em um período de 168 horas (7 dias) e as de desaguamento foram, respectivamente, de 60,59 % e de 99,05% para o geotêxtil de massa por unidade de área de 612 g/m², 42,9% e 98,44% para o geotêxtil de massa por unidade de área 895 g/m² e 47,9% e 98,51% para o geotêxtil de massa por unidade de área 414 g/m².

Na Tabela- resumo 16, tem- se os autores que utilizaram métodos de cone e *Jart Test* para seleção de polímeros aplicados ao desaguamento de lodos (de ETAs ou de ETEs) utilizando diferentes métodos de desaguamento (LDs ou SCR).

Tabela 16 - Tabela - resumo dos autores que utilizaram condicionamento de lodos para desaguamento

Autores e ano	Título da Pesquisa/ Artigo	Tipo de lodo	Teste de condicionamento de polímero utilizado	Método de desaguamento aplicado
Mortara (2011)	Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios	ETE	<i>Jart Test</i>	LD
Souza (2016)	Uso de geotêxtil para a desidratação de lodo da ETE Vila da Barca-PA	ETE	<i>Jart Test</i>	SCR
Scalioni <i>et al.</i> , (2019) e Urashima <i>et al.</i> , (2020)	Análise do Condicionamento Químico de Resíduos com Alto Teor de Líquido por Ensaio de Cone: Estudo de Caso com Lodo de ETA	ETA	Teste de Cone	SCR
Urashima (2020)	Sistema de confinamento de resíduos empregando geotêxteis comparados a leito de drenagem para desaguamento de lodo de estação de tratamento de água	ETA	Teste de Cone	LD e SCR
Ardila <i>et al.</i> , (2020)	Avaliação do Desempenho de Desidratação do Tubo Geotêxtil: Um Estudo Experimental de Desidratação de Lodo Gerado em uma Estação de Tratamento de Água	ETA	<i>Jart Test</i> e Teste de cone	SCR

Fonte: autora

2.7 Geotêxteis

No decorrer das últimas décadas, é possível verificar nas obras de engenharia a expansão do uso de materiais sintéticos em substituição aos materiais granulares convencionais, ou seja, pedra, britas, entre outros. Isso se deu pelo bom desempenho que materiais sintéticos propiciam em uma obra: diminuição dos custos e facilidade de instalação, fazendo com que sejam empregados com frequência. Uma das aplicações desses materiais é como elemento de filtração. Pode-se observar atualmente um interesse crescente no uso de geossintéticos para drenagem e filtração, principalmente no Brasil.

2.7.1 GEOSINTÉTICOS PARA FILTRAÇÃO E DRENAGEM

Os geossintéticos para drenagem e filtração podem ser utilizados exercendo uma ou mais funções dentro de uma obra de engenharia. Na Tabela 17 são definidas as principais funções, de acordo com a norma brasileira NBR 12.533- Geossintéticos-Terminologia (ABNT, 2003).

Tabela 17 - Principais funções dos Geossintéticos para drenagem e filtração

Função	Sigla	Explicação
Controle de erosão superficial	E	Prevenção de erosão superficial de partículas de solo devido a escoamento superficial de um fluido
Drenagem	D	Coleta e condução de um fluido pelo corpo de um geossintético
Filtração	F	Retenção de um solo ou de outras partículas, permitindo a passagem livre do fluido em movimento
Proteção	P	Limitação ou prevenção de danos a elementos de obras geotécnicas
Reforço	R	Utilização de propriedades mecânicas de um geossintético para a melhoria do comportamento mecânico de uma estrutura geotécnica
Separação	S	Ação de impedir a mistura ou interação de materiais adjacentes

Fonte: ABNT, (2003).

De acordo com a NBR 12.533 –Geossintéticos –Terminologia (ABNT, 2003), são apresentadas na Tabela 18 a classificação, definições e siglas de geossintéticos utilizados para filtração e drenagem. São também apresentadas, entre colchetes as siglas adotadas pela International Geosynthetic Society (IGS), quando estas existem e diferem das brasileiras.

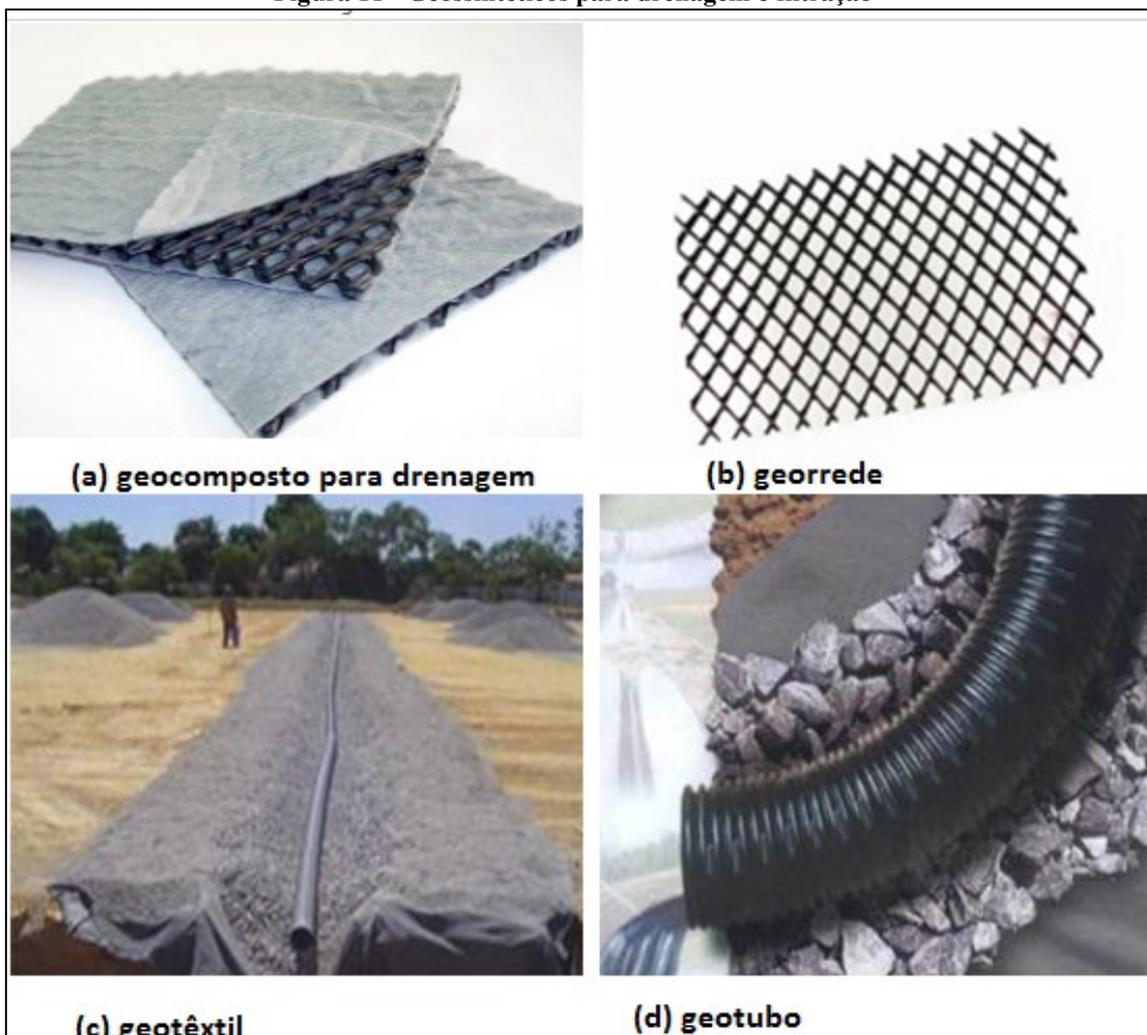
Tabela 18 - Terminologia dos Geossintéticos

Tipos	Sigla	Definição
Geossintético	G	Produto polimérico (sintético ou natural) industrializado, desenvolvido para aplicação em obras geotécnicas. Desempenhando uma ou mais funções, entre as quais destacam-se: reforço, filtração, drenagem, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial
Geocomposto	GC	Produto industrializado formado pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si ou com outros produtos, geralmente concebido para desempenhar uma função específica
Geocomposto para drenagem	GCD	Produto desenvolvido para drenagem, composto geralmente de um geotêxtil que atua como elemento de filtro e de uma georrede ou um geoespaçador que atua como elemento drenante
Geoespaçador	[GSP]	Produto com estrutura tridimensional constituída de forma a apresentar grande volume de vazios, utilizado predominantemente como meio drenante. Exemplo: geoespaçador em cúspides nas duas faces (ou de pata dupla) na cor preta, e de cúspides em uma face (ou de pata simples) na cor amarela, utilizados como meio drenante
Georrede	GN [GNT]	Produto com estrutura em forma de grelha com função predominante de drenagem
Geotêxtil	GT [GTX]	Produto têxtil bidimensional permeável, composto de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios formando estruturas tecidas, não-tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhem várias funções numa obra geotécnica
Geotêxtil não-tecido	GTnw	Produto composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos térmicos ou químicos
Geotêxtil não-tecido agulhado	-	Fibras interligadas mecanicamente, por processo de agulhagem
Geotêxtil não-tecido termoligado	-	Fibras interligadas por fusão parcial obtida por aquecimento
Geotêxtil não-tecido resinado	-	Fibras interligadas por meio de produtos químicos
Geotêxtil tecido	GTw	Produto obtido do entrelaçamento de fios
Geotêxtil tricotado	GTw	Produto obtido do entrelaçamento de fios por tricotamento
Geotubo	-	Produto de forma tubular com função drenante. Ex: corrugado, flexível

Fonte: NBR 12.533, 2003.

A Figura 11 ilustra alguns dos geossintéticos utilizados para drenagem e filtração.

Figura 11 - Geossintéticos para drenagem e filtração



Fonte: Geofoco, 2012.

As principais características de filtração e drenagem para diferentes tipos de manufatura de geotêxteis estão especificadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Principais características e propriedades dos geotêxteis

Método de Manufatura	Fibras/tratamento	Características de filtração e drenagem
tecido	laminetes	- média a alta permissividade; - o AOS (“Aparent Opening Size”) pode ser controlado pelo processo de tecelagem; - as fibras podem se afastar modificando o AOS.
	monofilamentos	- AOS relativamente elevados; - alta permissividade; - as fibras podem se afastar modificando o AOS.
	multifilamentos	- AOS menores; - média permissividade; - resistência à punção melhor que outros.

não-tecido	termoligação	- o AOS é variável, já que a densidade das fibras na estrutura é variável; - permissividade variável; - algumas estruturas tem a capacidade de suportar carga hidráulica elevada
	agulhagem	- AOS variável; - tamanho de AOS, geralmente, menores; - boa resistência à punção, particularmente para estruturas mais densas.
tricotagem	multifilamentos	- AOS controlado pelo processo de fabricação; - elevada resistência à punção; - permissividade controlada pelo processo de fabricação; - não é comumente utilizado.

Fonte: Corbet, 1992.

A Tabela 20 apresenta as matérias-primas que mais se aplicam aos geossintéticos, em ordem alfabética, relacionando-as aos respectivos tipos de geossintéticos.

Os geotêxteis são constituídos por polímeros, estes aditivos são usados para melhorar as propriedades do produto final ou facilitar operações de transformação, podendo exercer os papéis de lubrificantes, estabilizantes e plastificantes (ROCHA, 1993).

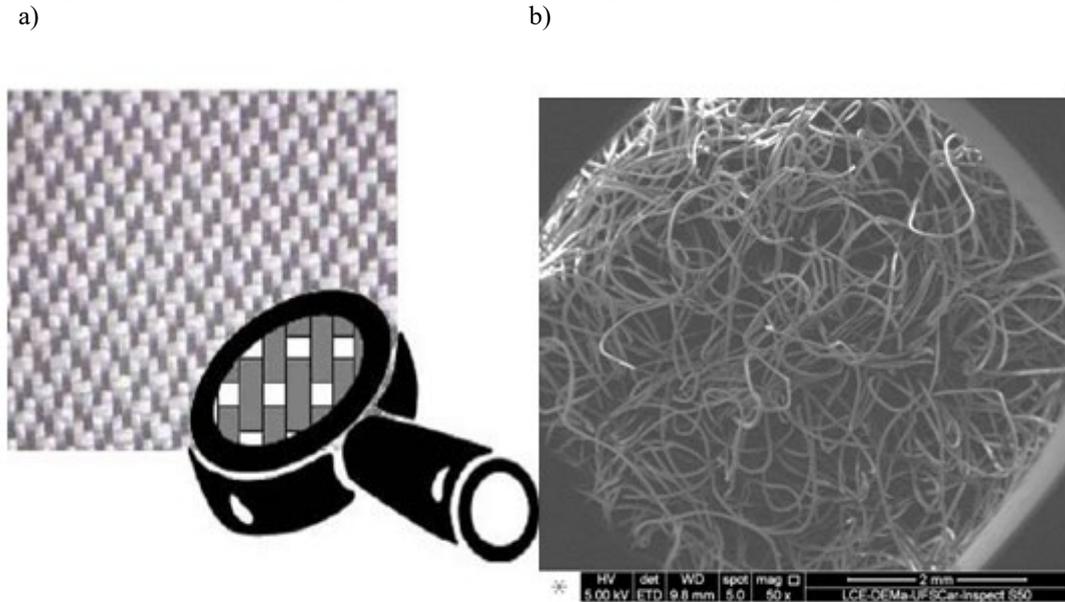
Tabela 20 - Matérias -primas dos geossintéticos

Matérias-Primas	Siglas das matérias-primas	Siglas dos geossintéticos mais utilizados
Poliamida	PA	GT,GI,GB,GC,GCD,GCL
Policloreto de Vinila	PVC	GM,GG,GP
Poliéster	PET	GT,GG,GCL,GCD,GB,GR
Polietileno	PE	GG,GC,GS
Polietileno Expandido	EPS	GE,GCD, GS
Polietileno de Alta Densidade	PEAD	GM,GC,GP
Polipropileno	PP	GT,GG,GCL,GCD,GCR,GP,GM

Fonte: ABINT, 2001

A Figura 12 ilustra uma imagem do geotêxtil tecido e não tecido, detalhando seus arranjos estruturais. Esses dois geotêxteis são os principais utilizados em pesquisas de desaguamento de lodo.

Figura 12 - Tecedura dos geotêxteis utilizados: a) geotêxtil tecido e b) geotêxtil não- tecido



Fonte: adaptado de Benjamin (2006) e LCE, 2020.

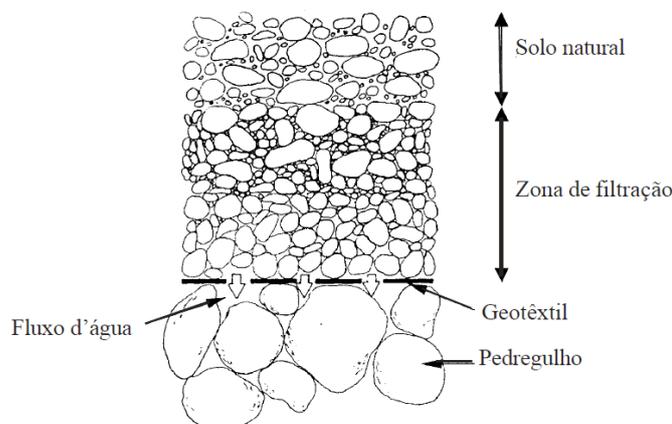
2.7.2 MECANISMOS DE FILTRAÇÃO EM SOLOS COM USO DE GEOSSINTÉTICOS

A auto filtração e a formação de uma rede de arcos são os dois mecanismos responsáveis pela ação de um gradiente hidráulico sob o sistema solo/geotêxtil, que provoca um fluxo d'água e induz a um rearranjo de partículas. A auto- filtração pode acontecer quando se tem a ocorrência de um fluxo unidirecional e a atuação do filtro não fica restrita ao geotêxtil, mas propaga-se para o solo adjacente, onde se forma um filtro natural. No início do processo ocorre uma inevitável perda de partículas finas do solo através do filtro natural formado no solo e do filtro de geotêxtil sob o efeito do fluxo d'água, enquanto as partículas maiores são retidas no quando o diâmetro do poro fica menor do que a partícula. Estas partículas maiores retidas limitam um pouco as menores que, por sua vez, retêm partículas ainda menores, até que não seja possível nenhuma partícula do solo migrar e, depois de algum tempo, o processo se estabiliza. Forma-se, nessa condição, uma zona de estrutura de filtro graduado no interior do solo, nas proximidades do geotêxtil, denominada de pré-filtro (Figura 13) (FREITAS, 2003).

Uma rede de arcos pode se desenvolver em função das aberturas do geotêxtil e do tipo de solo, conforme mostra a Figura 14. Quando o fluxo ocorre de cima para baixo, algumas partículas menores são carregadas através do filtro natural formado no solo e do filtro de geotêxtil deixando vazios no material. As partículas adjacentes tendem a redistribuir as tensões verticais devidas à força de percolação e à força da gravidade,

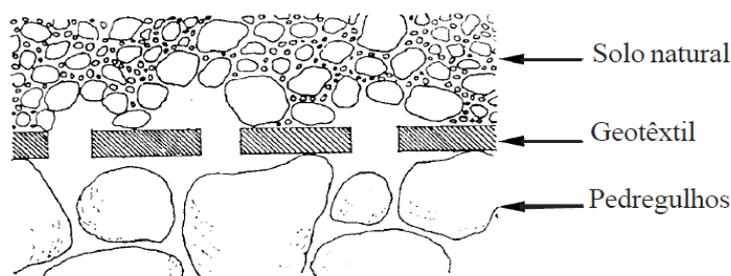
formando arcos que dificultam a passagem das partículas com diâmetros menores que ficam acima delas (FREITAS, 2003).

Figura 13 - Filtro graduado desenvolvido dentro do solo adjacente ao geotêxtil



Fonte: Freitas, 2003.

Figura 14 - Arcos de solo sobre os poros do geotêxtil



Fonte: Freitas, 2003.

Na pesquisa realizada por Rollin e Lombard (1998), a presença de arcos pode sofrer alterações segundo uma seleção do produto e, sendo assim, quatro são as propriedades do geotêxtil capazes de acelerar a formação da rede de arcos, como mostradas a seguir:

- baixa permeabilidade, para reduzir as forças de percolação sobre a partícula;
- baixa porosidade, para não permitir carreamento excessivo de partícula;
- uma grande espessura para aumentar a área de molhagem d'água, buscando um decréscimo das forças de percolação sobre as partículas de solo;
- superfície com característica de abundância de fibras livres em contato com o solo.

Rollin e Lombard (1998) também acreditam que a estabilização da rede de arcos está ligada à ação de forças elétricas e de absorção entre o geotêxtil e partículas de solo, bem como, entre partículas por si só.

No mecanismo da auto filtração do solo a presença de um fluxo reverso induz a uma condição mais desfavorável para o surgimento do fenômeno. Contudo, quando o período em que a água percola num determinado sentido é longo, ainda é possível a constituição de um filtro, se bem que pouco eficiente. Caso o ciclo de reversão do sentido de fluxo seja curto, a chance de que se instale um filtro é bem menor (FREITAS, 2003).

De acordo com Vertematti (2004), os filtros geossintéticos mais utilizados são os geotêxteis, juntamente com agregados granulares abertos, como brita, ou com a combinação de geotêxteis tecidos e não-tecidos dependendo da finalidade ao qual são empregados. Assim, o geotêxtil funcionará como um sistema filtrante natural, onde esse deve ser capaz de manter intacta a estrutura do solo, retendo suas partículas mais grossas, que por sua vez, retém as menores e, na sequência conseguem reter partículas ainda menores. O geotêxtil atuará como um catalisador, causando a formação de um filtro natural no solo. Para que isso ocorra, ele deve apresentar, a curto prazo, uma permeabilidade superior à do solo, evitando a ocorrência de perdas de carga no fluxo de água. A longo prazo, a permeabilidade do filtro pode eventualmente sofrer redução, mas deverá sempre se manter superior à do solo, fazendo com que a estrutura do solo se mantenha estável, mesmo que as partículas finas em suspensão no fluxo ainda estejam passando pelo filtro.

Segundo Faure (1990), a massa por unidade de área sob condição de tensão nula, intervém indiretamente na transmissividade. Gardoni e Palmeira (2000) e Gardoni *et al.*, (2000) efetuaram uma modelagem estatística com dados de ensaios de transmissividade com geossintéticos sob condições de tensão de compressão e constataram que a massa por unidade de área possui influência na transmissividade dos geotêxteis não tecidos agulhados de poliéster analisados. Para os geocompostos com diferentes massas por unidade de área avaliados neste mesmo estudo, os resultados mostraram o mesmo comportamento de transmissividade encontrado para os geotêxteis não tecidos. No presente caso, a tensão de compressão e a massa por unidade de área do produto são as variáveis de maior influência na transmissividade. Mas a espessura é um parâmetro físico de significativa influência nas propriedades hidráulicas dos geossintéticos. Rauman (1982), Koerner e Sankdey (1982) e Campbell e Wu (1994) chegaram a conclusões semelhantes para estudo de transmissividade de geotêxteis tecidos, não tecidos e georredes.

A seguir, encontra-se a tabela resumo (Tabela 21) com as especificações dos geotêxteis utilizados nas pesquisas descritas no trabalho e seus respectivos resultados e/ou conclusões.

Tabela 21 - Tabela resumo de pesquisas realizadas com geotêxteis

Autores/Bibliografia	Pesquisa	Especificação geotêxtil	Resultados/Conclusões
RAUMAN(1982) KOERNER E SANKDEY(1982)	Transmissividade de geotêxteis tecidos, não tecidos e georredes	Geotêxteis tecidos, não tecidos e georredes.	Espessura e transmissividade influenciam nas propriedades dos geotêxteis
ROLLIN E LOMBARD (1988)	<i>Mechanisms Affecting Long-Term Filtration Behavior of Geotextiles</i>	Geotêxteis tecidos e não-tecidos	A estabilização da rede de arcos está ligada à ação de forças elétricas e de absorção entre o geotêxtil e partículas de solo, bem como, entre partículas por si só.
FAURE (1990)	<i>Geotextile filter behavior with critical filtration conditions</i>	Geotêxteis tecidos e não-tecidos	Massa por unidade de área, sob condição de tensão nula, intervém indiretamente na transmissividade.
CAMPBELL E WU (1994)	Transmissividade de geotêxteis tecidos, não tecidos e georredes	Geotêxteis tecidos, não tecidos e georredes.	Espessura e transmissividade influenciam nas propriedades dos geotêxteis
GARDONI & PALMEIRA (2000)	<i>Geotextile in filtration: a state-of-the-art review and remaining challenges.</i>	Geotêxteis não-tecidos agulhados de poliéster	Massa por unidade de área possui influencia na transmissividade dos geotêxteis não tecidos agulhados de poliéster analisados.
GARDONI <i>et al.</i> , (2000)	<i>Geotextile in filtration: a state-of-the-art review and remaining challenges.</i>	Geotêxteis não-tecidos agulhados de poliéster	Massa por unidade de área influencia na transmissividade dos geotêxteis não tecidos agulhados de poliéster analisados.

Fonte: autora

Os mecanismos de pré- filtro e auto filtração podem ocorrer, também, aplicados aos lodos, quando estes materiais são submetidos ao desaguamento em protótipos de LD em escala real ou laboratorial. Esses fenômenos foram observados por Cordeiro, 2001; Achon *et al.*, 2008; Mortara, 2011 e Minatel, 2021.

2.7.3 FILTRAÇÃO DE PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO

A filtração em suspensão acontece quando o líquido percolante possui pequenas partículas em suspensão, sem contato superficial entre elas. Pode acontecer este fenômeno em filtração de rejeitos finos, filtração de água em estações de tratamento ou devido a falhas em execução de drenos. (MUÑOZ, 2005).

O comportamento de um sistema de filtração de partículas em suspensão pode variar de acordo com o tipo de material. No caso de solo granular, as partículas retidas podem formar uma camada de material ainda permeável, em fenômeno equivalente ao aumento da espessura do filtro; já para o solo coesivo, o problema da colmatação passa a ter maior importância (URASHIMA, 1999).

Em solos com altas condutividades hidráulicas localizadas e tendência à sufusão pode ocorrer filtração de partículas em suspensão, em virtude do carreamento de partículas finas da base e ocorrência de grandes vazios. Sendo assim, algumas vezes, a filtração em meio poroso torna-se uma filtração de partículas em suspensão (MUÑOZ, 2005).

Segundo Faure *et al.*, (1993), a filtração em suspensão acontece principalmente em situações de solos de base fofos, mal compactados e com granulometria descontínua ou coesivos fissurados, pois as partículas finas desses solos podem ser carreadas pela água. A filtração de solos com finos em suspensão é, portanto, um caso muito crítico, visto que a retenção dos finos tende a reduzir drasticamente a permeabilidade do meio.

Segundo Vidal e Urashima (1999), devido à perda de carga que ocorre quando a partícula carreada encontra o filtro, ela tende a se depositar em sua superfície, o que ocorre mesmo para partículas muito pequenas, bem menores que a abertura de filtração do elemento filtrante. Assim, é preciso avaliar a perda de carga causada pela deposição das partículas para prever a necessidade do processo de troca ou lavagem do filtro. Partículas muito finas criam rapidamente uma barreira de baixa condutividade hidráulica, que, em função da sua concentração na suspensão, pode exigir troca ou lavagem do filtro com muita frequência.

Na filtração de partículas em suspensão, o processo de deposição é função da velocidade de fluxo, da concentração de partículas, do tipo de solo e da estrutura do material filtrante. A abertura de filtração tem influência representativa apenas no caso de partículas não coesivas (URASHIMA, 1999)

2.7.4 PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS APLICADOS À FILTRAÇÃO

De acordo com Freitas (2003) exercendo a função de filtro os geotêxteis têm como propriedades relevantes as: físicas, mecânicas, hidráulicas e a durabilidade.

Todas afetam o desempenho do filtro de geotêxtil, sendo cada uma delas descritas separadamente a seguir.

2.7.4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

- **Espessura (t_{GT})**

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. É definida como a distância entre as superfícies superior e inferior do material, para uma dada pressão.

- **Porosidade (n) e porosimetria**

A porosidade é uma propriedade dos geotêxteis não-tecidos, definida como a razão entre o volume de vazios do geotêxtil e seu volume total ou ainda, segundo Giroud (1996), relacionar a massa por área expressa em g/m^2 , espessura de um geotêxtil em mm e massa específica das fibras (ρ_f) em gramas, conforme Equação 1:

$$n = 1 - \frac{M_A}{\rho_f T_{GT}} \quad (1)$$

Giroud (1996) sugere ordens de grandeza de porosidades em torno de 0,9 para geotêxteis não tecidos agulhados e porosidade de 0,7 para tecidos termo ligados.

A porosimetria é a medida das dimensões dos poros e sua distribuição, sendo a determinação da abertura aparente de fundamental importância para a previsão do seu comportamento como elemento filtrante.

Estudos efetuados por Gardoni e Palmeira (2000) mostraram que o tamanho de abertura de poros de um geotêxtil não tecido tende a um limite finito com o aumento da espessura.

A percentagem de área aberta (PAA) é, por sua vez, uma propriedade dos geotêxteis tecidos, sendo definida pela Equação 2:

$$PAA = \frac{\text{Total da área individual das aberturas}}{\text{Total da área do material}} \quad (2)$$

A percentagem de área aberta (PAA) não tem significado para os geotêxteis não-tecidos, porquanto eles apresentam poros de dimensões pequenas, de formas variáveis e situadas em diversas profundidades na espessura.

- **Abertura de filtração**

O tamanho da abertura de filtração (*"filtration opening size"*, FOS), definida como a abertura do geotêxtil equivalente ao maior diâmetro da partícula de solo que consegue passar através dele, é o índice mais utilizado para definir o potencial de filtração, em virtude da dificuldade encontrada para determinação da percentagem de área aberta.

Gardoni (2000) relata que a abertura de filtração (O_{95}) de um geotêxtil é o parâmetro mais importante para o dimensionamento de filtros.

A determinação da abertura de filtração mais frequente é através de peneiramento, variando-se a metodologia conforme descrição a seguir:

- ✓ peneiramento a seco - Metodologia desenvolvida pelo U.S. Army Corps of Engineers, a partir da qual se obtém o AOS (*"apparent opening size"*). O AOS define o O_{95} , ou seja, o tamanho de abertura para o qual 95% dos poros do material são menores do que aquele diâmetro.
- ✓ peneiramento úmido – Metodologia desenvolvida pelo Instituto Franzius de Hannover, a partir do qual se obtém o D_w . Esse valor é definido a partir de uma relação entre a fração mais grosseira da areia que passa pelo geotêxtil e a fração que fica retida.
- ✓ peneiramento hidrodinâmico – Metodologia desenvolvida pelo Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas, a partir do qual se obtém o D_{95} . Esse valor corresponde ao D_{95} da curva distribuição granulométrica da areia que passa pelo geotêxtil durante o ensaio.

A metodologia AOS consiste basicamente na realização de um peneiramento de contas de vidro de granulometria uniforme sobre o geotêxtil durante um período de dez minutos. Realiza-se o ensaio por sucessivos peneiramentos com diâmetros cada vez maiores, até que somente 5% ou menos passe através do material.

O teste tem sido estendido para cobrir todos os geotêxteis, incluindo os tipos não-tecidos. Este teste é simples, o que favorece o seu uso, porém está sujeito a muitas críticas e diversos autores consideram esta técnica inadequada e imprecisa.

No peneiramento úmido (D_w), do Instituto Franzius de Hannover é utilizado uma quantidade de material com distribuição granulométrica conhecida peneirada sobre um geotêxtil, submetidos a um fluxo de água pulverizada continuamente, dentro de um equipamento adaptado para este fim. Durante a realização do ensaio, o material granular que atravessa o geotêxtil é coado num filtro de papel. A seguir, obtém-se sua distribuição granulométrica a partir de peneiras de malhas de diâmetro 45 a 2500 micras. A determinação do tamanho da abertura efetiva do geotêxtil, D_w , é efetuada

através de uma relação entre a fração mais grosseira que passou pelo material e a fração retida que ainda se apresenta em quantidade expressiva com relação à fração original.

Segundo descrito em SPADA (1991), o peneiramento hidrodinâmico (D_{95}), desenvolvido na França, emprega um equipamento projetado especificamente para este objetivo, que se constitui de quatro cestos basculháveis de bases vazadas atrelados a uma roda móvel, em cuja base é posicionado um reservatório de água. Uma amostra de geotêxtil é posicionada no fundo de cada cesto com uma quantidade de areia padrão por cima. A roda em movimento submerge alternadamente os cestos, de tal forma que o geotêxtil fica coberto por uma lâmina d'água. As imersões sucessivas dos cestos duram 24 horas. Parte da areia que passa pelo geotêxtil é amostrada para ser submetida a um ensaio de peneiramento. A abertura de filtração é definida a partir da curva granulométrica, como sendo a dimensão das partículas para as quais 95 % em massa do solo tem dimensão inferior a elas (D_{95}).

Este ensaio apresenta boa reprodutibilidade de resultados, além de simular as condições de campo, no que se refere ao arraste de partículas pelo fluxo de água. Entretanto, quando se compara os valores obtidos pelos métodos anteriormente descritos, diferentes valores de abertura de filtração são encontrados, devido às diferenças das metodologias de investigação empregadas.

2.7.4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Durante a aplicação em obra, os geotêxteis estão sujeitos a diferentes ações que podem ser mecânicas, estáticas ou dinâmicas, como os esforços de tração, compressão, puncionamento e rasgamento.

O comportamento à tração de um geotêxtil depende de fatores como o polímero constituinte, a estrutura, processo de fabricação, tipo de ligação, entre outros.

Este comportamento de geotêxteis submetidos à tração, é geralmente caracterizado pela curva que relaciona força por unidade de largura da amostra ensaiada (kN/m). A partir desta curva é possível obter a resistência à tração, as deformações na ruptura e o módulo de rigidez do material em questão (BALTAZAR, 2008).

Outra propriedade mecânica relevante 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.

2.7.4.3 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

Quando destinados ao desaguamento, o geotêxtil exerce a função de filtro, liberando para o ambiente externo a fração líquida.

Em projetos com filtros de geotêxteis, os parâmetros hidráulicos de permeabilidade, permissividade e transmissividade, são de grande importância para a especificação do material mais adequado para a obra geotécnica.

A permeabilidade do geotêxtil sob condição de fluxo laminar pode ser determinada pela Lei de Darcy:

$$v = ki \quad (3)$$

Onde: v é a velocidade aparente de fluxo (m/s); k é o coeficiente de permeabilidade do geotêxtil (m/s); i é o gradiente hidráulico (m/m).

Destaca-se em Gardoni (2000) que os geotêxteis de estruturas e porosidades idênticas, mas de espessuras distintas, podem apresentar mesmo valor de permeabilidade (K), uma vez que esta é uma propriedade intrínseca do geotêxtil que varia com a porosidade do tecido. Porém, sabe-se que o geotêxtil apresenta uma permeabilidade normal a seu plano (k_n) e uma permeabilidade ao longo de seu plano (k_p) e estas grandezas variam em função da espessura do geotêxtil.

A permeabilidade no plano normal do geotêxtil é definida para a função de filtração como a permissividade (Equação 4) e a permeabilidade ao longo do próprio plano do geotêxtil (k_p) é a transmissividade (θ) (Equação 5). Essa é uma propriedade inerente ao geotêxtil não tecido.

$$\psi = \frac{k_n}{t_{GT}} \quad (4)$$

Onde: ψ é a permissividade (s^{-1}); k_n é o coeficiente de permeabilidade através do geotêxtil (cm/s); t_{GT} é a espessura do geotêxtil sob tensão normal (cm).

$$q = k_p t_{GT} \quad (5)$$

Onde: θ é a transmissividade do geossintético (cm^2/s); k_p é a permeabilidade do geossintético ao longo do seu plano (cm/s).

2.7.4.4 DURABILIDADE

Essa propriedade está associada à integridade do geossintético durante a instalação na obra ao longo da vida útil dela.

Durante a instalação podem ocorrer rasgos e abertura de orifícios pela presença de pedregulhos, angulosos sob a superfície do terreno na qual foi instalado o geotêxtil.

Durante o tempo de vida dos materiais, danos por exposição à luz solar, ataque biológico, químico, entre outros, podem comprometer propriedades essenciais do geotêxtil como a resistência.

As degradações no material podem ser mecânicas, químicas ou biológicas, o que pode provocar uma redução significativa do tempo de vida dos materiais.

- 1) Degradação mecânica: são alterações sofridas pelo material devido aos esforços provenientes de manuseio, instalação, compactação de solo sobrejacente, entre outros. Na fase de instalação os danos mais comuns são provocados pelo tráfego de equipamentos pesados sobre os geossintéticos, ou ainda queda de objetos, furos por objetos pontiagudos e abrasões. Os danos mecânicos desta fase da obra devem ser quantificados assim que concluída a instalação, e comparados com os fatores de redução considerados enquanto na fase de dimensionamento de projeto.
- 2) Degradação Química: pode ser provocada pela ação do oxigênio, íons metálicos, ácidos, bases, solventes e água. (SANTOS, 2014). Estes fatores podem implicar em profundas alterações nas cadeias poliméricas, como: quebra de ligações químicas, o que leva a formação de espécies quimicamente alteradas. Esse tipo de alteração modifica propriedades dos polímeros e pode comprometer a função a qual o geotêxtil foi destinada, tanto em relação ao comportamento mecânico, à permeabilidade, ou ainda em colmatações químicas que levam à obstrução do geotêxtil.
- 3) Degradação Biológica: através da ação dos micro-organismos que pode levar à degradação de geossintéticos e pode ser encontrada em condições ambientais distintas, mas, de modo geral, necessitam de matéria orgânica encontrada em aditivos e polímeros utilizados na fabricação de geossintéticos, para a produção de carbono e criação de um ambiente adequado para se desenvolverem. Essa degradação biológica é comumente realizada por fungos, bactérias e algas. A temperatura, o pH do meio e a umidade podem ser catalisadores da proliferação destes micro-organismos.

Conforme citado por Minatel (2021) e descrito por Palmeira (2018) independentemente do tipo de tecedura do geotêxtil, para a função de filtro, alguns critérios precisam ser avaliados nos geotêxteis para que funcionem de maneira adequada:

- Critério de retenção: garante a capacidade do geotêxtil de reter as partículas que não são desejáveis no filtrado;
- Critério da permeabilidade: garante a permeabilidade para as substâncias desejáveis através do geotêxtil, sendo que ela deve ser maior que a do substrato que está em contato;
- Critério anticolmatação: garante que o filtro não fique colmatado, ou seja, que não haja o bloqueio das aberturas do geotêxtil pelas partículas do drenado ou por micro-organismos;
- Critério de sobrevivência e durabilidade: garante que o geotêxtil terá propriedades mecânicas suficientes para que não se danifique no manuseio, instalação e a execução da obra, além de ter durabilidade maior ou igual à vida útil da obra.

2.8 Colmatação

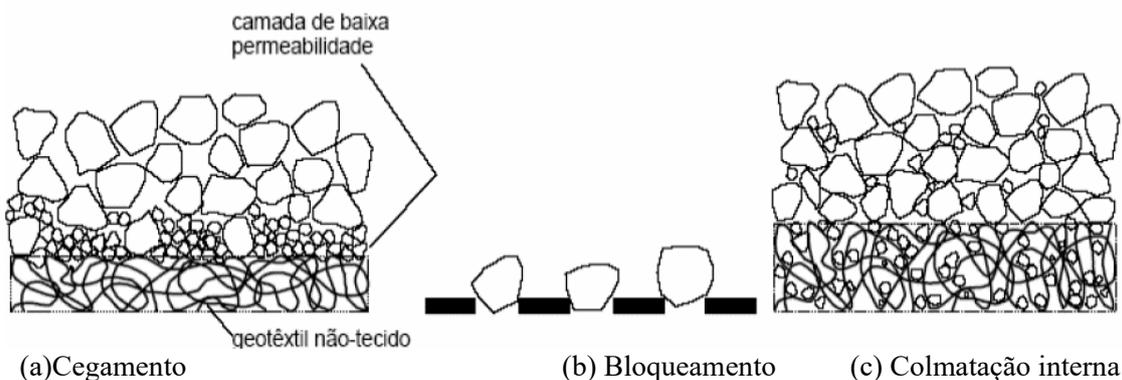
A utilização que não atenda os critérios de geossintéticos como filtro ou a má utilização deles ao longo de sua vida útil, poderá acarretar problemas (PALMEIRA, 2003).

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

Segundo Palmeira (2003), colmatação é um termo geral empregado para caracterizar o mau funcionamento de um filtro causado por uma incompatibilidade entre dimensões das partículas do solo de base e dos poros do filtro, que resulta em uma severa perda de capacidade de descarga do sistema drenante, aumento de poro-pressão na vizinhança do filtro e alterações das condições inicialmente estabelecidas para o regime de fluxo. Para dar uma medida do grau de cautela presente num critério de permeabilidade, 75% dos poros de geotêxtil podem estar colmatados sem que isto

ocasiona dificuldade para o seu funcionamento (JOHN, 1987). Nos filtros geotêxteis, a colmatção pode ser química, física ou biológica. A colmatção física pode ocorrer por cegamento, bloqueio superficial ou colmatção interna dos poros, como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Colmatção em filtros geotêxteis



Fonte: Palmeira, 2003.

O cegamento ou *blinding* do filtro (Figura 15a) acontece quando as partículas mais finas são carregadas, migrando por vazios até serem retidas sobre a superfície do filtro, o que, por sua vez causa a formação de uma camada de baixa permeabilidade denominada “*cake*”, que pode levar a uma redução significativa da permeabilidade global do sistema. Já o bloqueio superficial ou *blocking* (Figura 15b) acontece quando partículas individuais fecham a entrada dos poros do geotêxtil (MUÑOZ, 2005).

A colmatção interna ou *clogging* (Figura 15c) é causada pelo fechamento dos poros e dos canais de fluxo no interior da camada de geotêxtil advindo da intrusão de partículas de lodo, precipitação de substâncias ou proliferação de bactérias, por exemplo, (MUÑOZ, 2005). Já, o entupimento é definido por Bourgès-Gastaud *et al.*, (2014) como falta de condutividade hidráulica comparado com a exigida pela estrutura na qual o geotêxtil está instalado.

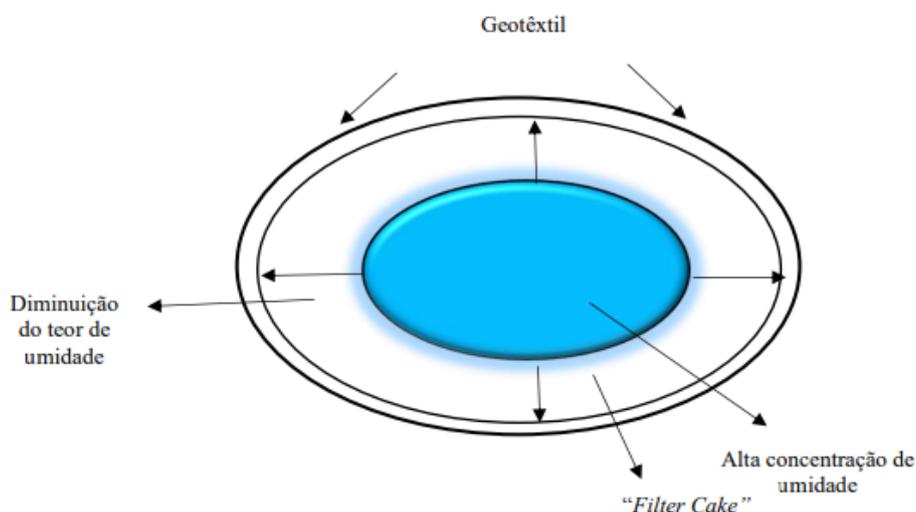
Aplicado aos LD, o fenômeno da colmatção verificado por Barroso (2007) e Mortara (2011) é caracterizado como a redução de vazão ao longo do tempo nestes sistemas, advindo, também, da obstrução dos poros do geotêxtil pelas partículas menores do lodo. Segundo Silveira (2012), a colmatção afeta diretamente a capacidade drenante do meio poroso, fazendo o fluxo diminuir à medida que os vazios diminuem.

Giroud (1996) relata que as partículas retidas no interior do geotêxtil podem estar acumuladas de duas maneiras distintas: uniformemente dispersas no espaço de poro do geotêxtil ou aglutinadas ao redor das fibras.

Em relação ao SCR (sistema de confinamento de resíduos), quando um material do tipo lodo, seja ele um sedimento argiloso ou resíduo industrial, passa por um processo de filtração com geotêxtil, a perda de partículas através do geossintético para rapidamente e a água drenada torna-se mais limpa. Provavelmente, isto se dá devido à colmatação física ou biológica do geotêxtil e este processo é chamado de *Filter Cake*, o qual aumenta a filtração, porém diminui a permeabilidade (LESHCHINSKY, 1992; GAFFNEY *et al.*, 1999).

O *Filter Cake* é uma película que se forma na interface do geotêxtil com o material que está sendo desaguado. Esta película dificulta a passagem do fluido que está no interior do sistema através do geotêxtil (Figura 16).

Figura 16 - Distribuição da umidade e formação do *Filter Cake*



Diminuição
do teor de
umidade

Fonte: modificado de Gaffney *et al.* 1999.

Segundo estudos feitos por Moo-Young *et al.*,(2002), a quantidade de sólidos em suspensão durante a filtração ou TSS (total suspended solids) é alta no início do processo, mas diminui sensivelmente assim que se forma o *Filter Cake*. Todos estes fenômenos que dificultam a saída do drenado costumam produzir um alto teor de umidade no interior do SCR, o que, em alguns casos, requer a realização de um dessecamento, ou seja, a abertura dos mesmos para que a parte úmida no seu interior seja exposta ao ar e para que haja, por evaporação, uma diminuição ainda maior do teor de umidade (GAFFNEY *et al.*, 1999; FOWLER *et al.*, 2002), o que não ocorre com os leitos de drenagem (LD), por serem sistemas abertos e a evaporação ser contínua.

A colmatação física é de grande importância nos casos em que o filtro se encontra em contato com um líquido percolante com alta suspensão de sólidos, como o lodo, que pode acumular sobre ou dentro do geotêxtil (FREITAS, 2003). A colmatação

química ocorre por causa de reações entre elementos dissolvidos no fluido percolante, que resultam na formação de precipitados, diminuindo o espaço disponível para a passagem do fluido. Ela é resultante da presença de carbonatos e sulfatos que dissolvidos no fluido percolante possibilitam o desenvolvimento de cristais de sais que ocupam os vazios do meio poroso, quando a água evapora sob condições atmosféricas. Tal processo, com o transcorrer do tempo, induz à colmatação físico-química do geotêxtil (FREITAS, 2003).

Como causas da colmatação têm-se também aquelas resultantes da atividade microbiana, causado pelo crescimento de biofilme favorecendo a deposição de óxidos de ferro, entre outros (MENDONÇA *et al.*, 2000).

Segundo Mendonça *et al.*, (2000), as superfícies em meio aquático são muito atrativas para a proliferação de colônias de bactérias devido à facilidade de obtenção de nutrientes do meio líquido. As bactérias aderem firmemente à superfície do geotêxtil, na qual se desenvolvem, reproduzem e produzem polímeros extracelulares, causando à colmatação do filtro. A este grupo formado por células microbianas e polímeros extracelulares, dá-se o nome de biofilme.

2.9 Geotêxteis utilizados em pesquisas de desaguamento com LD

As pesquisas realizadas com o LD utilizam, em sua maioria geotêxteis não-tecidos, de massa por área 600 g/m², conforme recomendado por Cordeiro (2001). O geotêxtil tecido foi utilizado em algumas pesquisas de desaguamento de lodo de esgoto (ETE) também em LD, como Mortara (2011) e para lodo de ETA (Minatel, 2021).

Na Tabela 22, é apresentado um resumo geral das pesquisas brasileiras com uso de Leito de Drenagem para desaguamento de lodo de ETA e os respectivos geotêxteis utilizados.

Em relação ao SCR, estes utilizam geotêxteis tecidos e não-tecidos, porém, não foram especificados nesta pesquisa, pois não são o foco.

Tabela 22 - Resumo geral das pesquisas brasileiras com LD e geotêxteis utilizados

Autor	Ano	Título da Pesquisa	Geotêxteis utilizados
Cordeiro	2001	Processamento de lodos de estações de tratamento de água (ETAs)	Geotêxteis não-tecidos massa/área 150, 200, 500 e 600 g/m ² (BIDIM)
Achon e Cordeiro	2004	Análise Crítica da Implantação de Sistemas Naturais de Remoção de	Geotêxtil não-tecido massa/área 600 g/m ² (BIDIM)

		volume de lodo de ETA.	
Fontana	2004	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	Geotêxteis não-tecidos massa/área 150, 200, 500 e 600 g/m ² (marca não consta)
Barroso	2007	Influência das micro e macro propriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leito de drenagem	Geotêxtil não-tecido massa/área 600 g/m ² (marca não consta)
Achon	2008	Leito de Drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água.	Geotêxtil não-tecido massa/área 600 g/m ² (BIDIM)
Mortara	2011	Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios	Geotêxtil não tecido RT21 da BIDIM massa/área 400 g/m ² , e a MacTex N – 350P da MACAFERRI, massa/área 271 g/m ² ; Geotêxteis tecidos da HUESKER Hate 55/55 e 80/80, de, e Propex 14000 de massa/área 140 g/m ² .
Reis	2011	Estudo de influência de cobertura plástica na remoção de água de lodos de estações de tratamento de água em Leitões de Drenagem	Geotêxteis não-tecidos massa/área 150, 200, 300, 400, e 600 g/m ² (marca não consta)
Santos	2012	Avaliação da aplicação do sistema de Leito de Drenagem como tratamento de lodo da estação de tratamento de água Bom	RT-21-BIDIM RT-26-BIDIM RT-31-BIDIM

Jardim em Uberlândia – MG			
Silveira	2012	Desaguamento de lodo de estações por tratamento de águas por leito de drenagem/secagem com manta geotêxtil	Geotêxtil não-tecido massa/área 600 g/m ² Maccaferri (modelo não consta)
Kuroda	2014	Drenagem / secagem de lodo de decantadores de ETAs em geotêxtil.	Geotêxteis não-tecidos massa/área 150, 300 e 600 g/m ² (marca não consta)
Cordeiro	2014	Evolução dos Leitos de Drenagem (LD) no Brasil – uma década de avanços	Geotêxtil não-tecido massa/área 600 g/m ² Maccaferri MT 600
Silveira	2015	Desaguamento do lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem/secagem	Geotêxtil não-tecido 600 g/m ² (marca não consta)
Lustosa	2017	Tratamento e aproveitamento de água de lavagem de filtro em estação de tratamento de água	Maccaferri - MACDRAIN 2L
Minatel	2021	Influência de múltiplos fatores no desaguamento de lodo de ETA em LD	Geotêxteis não-tecidos massa/área 300, 400, 500 e 600 g/m ² da OBER; Basetrac Woven W55/55UV Hate 105/105 DW da Huesker;
Esta pesquisa	2022	Avaliação da eficiência e do desaguamento de lodo de ETA em Leito de Drenagem utilizando diferentes geotêxteis e aplicação de polímero	Geotêxteis não-tecidos massa/área 400, 600, e 900 g/m ² da OBER; Geotêxtil tecido Basetrac Woven PP80 da Huesker;

Fonte: modificado de Minatel (2021).

2.10 Leito de Drenagem: pesquisas em escala laboratorial e piloto

Anteriormente à implantação de LD aplicados ao desaguamento de lodo (sejam de ETAs ou de ETEs) é imprescindível um projeto robusto, ou seja, que envolva inúmeras variáveis, como: espaço territorial, disponibilidade financeira, clima e outras variáveis dependentes das características e exigências do lodo e do sistema de LD em particular. Estes fatores devem ser determinados em escala laboratorial, anteriormente à implantação propriamente dita; assim, é possível minimizar algumas deficiências e otimizar e definir parâmetros de projeto de forma mais assertiva (FONTANA 2004; ACHON, BARROSO e CORDEIRO 2008).

Os trabalhos encontrados na literatura até o momento com LD em escala laboratorial e piloto serão resumidos e apresentados de forma cronológica.

Destaca-se que a ausência de pesquisas com lodos de ETA aplicados em protótipos de sistema de LD com a utilização de polímeros como condicionadores motivou o desenvolvimento desta pesquisa.

Bidone (1997) construiu um sistema composto por três leitos de secagem em nível de bancada, executados em colunas transparentes, nas quais o lodo foi disposto em lâminas de 30 cm de altura, sobre material suporte de areia de 16, 23 e 30 cm de espessura. O lodo utilizado provinha da ETA São João dos Navegantes (Porto Alegre, RS, Brasil) que utiliza sulfato de alumínio como coagulante. Na Tabela 23 são mostradas as características do lodo bruto anteriormente à disposição nos leitos de secagem e na Tabela 24 as características do lodo desaguado.

Tabela 23 - Características do lodo bruto disposto nos leitos de secagem

Parâmetro	Valores
Umidade (%)	96,50
Sólidos totais (%)	3,50
Sólidos totais fixos (%)	2,48
Sólidos totais voláteis (%)	1,02
Al ⁺³ (%)	5,90
Al ⁺³ (mg/L) (*)	1500

(*)Com exceção do Al⁺³(mg/L), os demais resultados foram expressos em base seca (temperatura =105 a 110 °C)

Fonte: Bidone *et al.*, (1997).

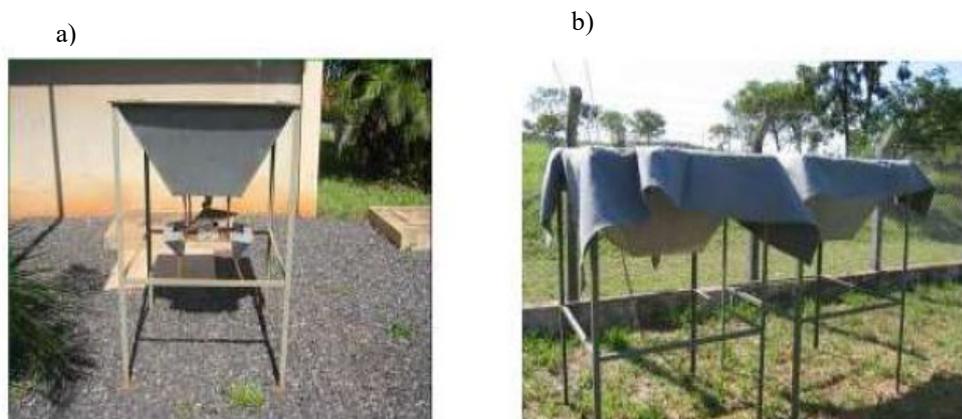
Tabela 24 - Características do lodo desaguado em cada leito ao final do experimento			
Parâmetro	Leito 1 (16 cm)	Leito 2 (23 cm)	Leito 3 (30 cm)
Umidade (%)	79,30	83,31	87,10
Sólidos totais (%)	20,70	16,69	12,90
Sólidos totais fixos (%)	7,12	11,83	9,38
Sólidos totais voláteis (%)	13,58	4,86	3,52
Al ³⁺ (%)	5,10	4,80	5,70

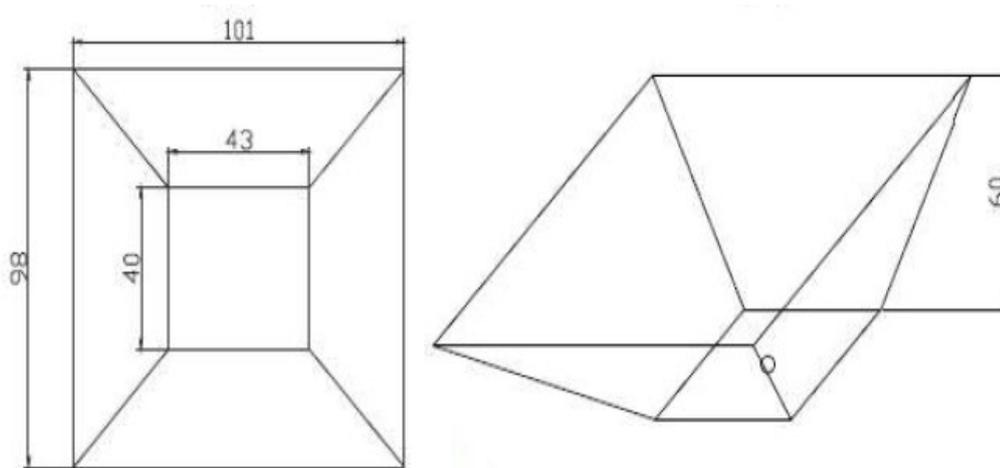
Fonte: Bidone *et al.*, (1997).

Os autores concluíram que as espessuras das camadas granulares influenciaram na quantidade de líquido drenado e na sua cor e turbidez, com vantagens para o leito de maior espessura.

Nos estudos de Barroso (2007) foram utilizadas três configurações diferentes de leitos de drenagem: leito de drenagem I - em formato de tronco de pirâmide com capacidade de 240 L; leito de drenagem II - com seção retangular de 0,20m x 0,30m e altura de 0,17m, com capacidade de 10L; e leito de drenagem III - que consiste em um cilindro com 0,15m de diâmetro e 0,30m de altura, com geotêxtil não-tecido de massa por área de 600g/m². Não foram utilizados polímeros para condicionamento do lodo. Nas Figuras 17 e 18 estão destacados os leitos utilizados por Barroso (2007) em sua pesquisa.

Figura 17 - (a) Protótipo de Leito de Drenagem I desenvolvido por Cordeiro (2001), utilizado por Barroso (2007). (b) vista geral dos dois protótipos usados nos ensaios de desaguamento por Barroso (2007). (c) Dimensões do leito de drenagem I utilizados por Barroso (2007)





c)

Fonte: Barroso (2007).

Figura 18 -(a) Vista do Leito de Drenagem II utilizado por Barroso (2007). (b) protótipos cilindros do Leito de Drenagem III Utilizados por Barroso (2007)

a)



b)



Fonte: Barroso (2007).

Na Tabela 25 estão destacados os resultados dos ensaios utilizando os Leitos de Drenagem I e II, com lodos provenientes da ETA que utilizava sulfato de alumínio como coagulante.

Tabela 25 - Teor de sólidos nos desaguamentos realizados por Barroso (2007)

Ensaio	% ST inicial	LD tipo:	(1) %ST após o fim da drenagem de água livre	Ocorrência de precipitação	%ST Final	(2) Dias
1	2,60	I	8,90	1º dia	30,40	7
3a	7,60	II	9,70	3º dia	88,90	7
3b	7,60	I	12,60	3º dia	98,10	6
5a	2,70	II	18,00	(3)	50,30	7
5b	4,20	II	14,50	(3)	42,30	7

(1) Todos os leitos haviam terminado a drenagem de água livre no primeiro dia de lançamento. (2) Dias decorridos desde o lançamento do lodo até a medição final do teor de sólidos. (3) Sem ocorrência de precipitação.

Fonte: modificado de Barroso (2007).

Na fase de secagem o autor indicou que ocorreu uma diminuição considerável da insolação a partir do quarto dia para os ensaios 1, 5a e 5b, concluindo que ela é um parâmetro primordial para a velocidade de drenagem. Além disso, evidenciou que a precipitação sozinha não determinava a velocidade de secagem, conforme mostram os dados de % ST dos ensaios 5a e 5b, presentes na Tabela 25.

Lima (2010) estudou o desaguamento do resíduo de decantador de uma ETA de ciclo completo, que possuía as características citadas na Tabela 26, em instalações de laboratório (Figura 19). Em cada um dos leitos foram utilizados geotêxteis não-tecidos de massa por área de 150, 300 e 600 g/m², designados GT1, GT2 e GT3. Os ensaios foram realizados com TAS de 2,5; 5 e 10 kg/m² para o GT1; 1,25; 2,5 e 5 kg/m² para o GT2 e 1,25; 2,5 e 5 kg/m² para o GT3, todos com vazão de carregamento do leito de 100 mL/min e tempo de drenagem e secagem de 7 dias. Foram construídos dois conjuntos de 9 leitos de drenagem - um para cada condição de exposição (área protegida por cobertura e área não coberta).

Tabela 26 - Característica do resíduo anterior a aplicação nos LD

Características	Valor
Turbidez (uT)	16900
pH	7,12
SST (mg/l)	11600
SSV (mg/l)	2380
SSF (mg/l)	9220
ST (mg/l)	14132
STV (mg/l)	2470
STF (mg/l)	11662

Fonte: Lima, (2010).

Figura 19 - Módulos de LD em escala de laboratório



Fonte: Lima, (2010).

Com relação ao drenado, foram consideradas duas condições de turbidez, de acordo com a Resolução CONAMA 357/2005, 100 uT- valor de turbidez limite para água doce – classe 2 e 10 uT –valor máximo considerado para a água drenada ser recirculada ao início da ETA. O geotêxtil de massa por área 600 g/m^2 obteve os maiores volumes de água drenada (87 e 83%) atendendo as duas condições de turbidez estabelecidas. A TAS recomendada para este geotêxtil foi de $2,5 \text{ kg/m}^2$. Outro dado relevante é que a incidência de raios solares, elevação da temperatura e a redução do teor de umidade contribuíram para reduzir o tempo necessário para extinção da lâmina líquida no LD, que foi menor que 3 dias, restando 4 para a secagem.

Macedo (2010) utilizou o mesmo resíduo (caracterizado na Tabela 27) que Lima (2010), porém, em escala piloto, (dimensões internas do LD, em planta, de $1,0 \times 2,5 \text{ m}^2$). Foi utilizado um geotêxtil de massa por área 350 g/m^2 e vazão de alimentação de 30 L/min para o primeiro LD e 600 g/m^2 com vazão de alimentação de $21,8 \text{ L/min}$ para o segundo. Ambos os geotêxteis eram de poliéster. Foram consideradas as fases de drenagem e secagem. Durante a fase de drenagem foram coletados filtrados em intervalos de 2 minutos, durante os 20 minutos iniciais, seguido de coletas em intervalos de 10 minutos até 1 hora de drenagem e, posteriormente em intervalo de 1 hora até o final desta fase. Um resumo dos resultados de interesse é mostrado na Tabela 28. Eles indicaram que o GT600 apresentou melhor eficiência em todos os parâmetros avaliados.

Tabela 27 - Características do resíduo estudado na instalação do LD

Características	LD com GT 350 g/m²	LD com GT 600 g/m²
pH	7,19	7,27
SST (mg/L)	12540	15360
SSV (mg/L)	2280	2700
SSF (mg/L)	10260	12660
ST (mg/L)	13635	16120
STV (mg/L)	2328	2737
STF (mg/L)	11307	13383
Coliformes totais (NMP/100 ml)	141380	-
<i>E. coli</i> (NMP/100 ml)	4130	-

Fonte: Macedo, (2010).

Tabela 28 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de drenagem/secagem

Obtenção de turbidez do drenado igual a 100 uT					Obtenção de turbidez do drenado igual a 10 uT					
GT usado no LD (g/m ²)	TS (kg/m ²)	Tempo mínimo (min)	TS mínima (mg/m ²)	VOLUME mínimo (V _{min})(%)	(100-V _{min}) (%)	Tempo mínimo (min)	TS mínima (mg/m ²)	VOLUME mínimo (V _{min}) (%)	(100-V _{min}) (%)	Turb. Final (uT)
350	3,27	6,85	0,20	5,87	94,13	26,30	0,61	18,00	82,00	3,07
600	2,98	5,44	0,32	10,0	90,00	32,90	0,64	20,00	80,00	1,05
	Lâmina líquida no final da alimentação (cm)	Tempo para extinção da lâmina líquida (d)	Lâmina líquida após 7 dias (cm)	Teor de SST no lodo desaguado após 7 dias (%)						
350	22,00	1	0	18,30						
600	20,00	1	0	18,00						

Macedo, (2010).

Reis (2011) realizou ensaios em escala laboratorial reduzida com “mini leitos” de drenagem com geotêxteis não- tecidos de massa por área 150, 200, 300 e 400 g/m² e um tecido massa por área 600 g/m², com o intuito de verificar qual geotêxtil apresentaria melhores resultados relativos à qualidade e volume do lodo drenado para ser utilizado em ensaios posteriores em protótipo similar ao leito de drenagem I, desenvolvido por Cordeiro (2001) e também utilizado nos estudos de Barroso (2007).

Nos ensaios iniciais no “mini leito” conforme mostra a Figura 20, eram colocados 250 mL de lodo bruto e após 1,0 e 1,5 minutos, ao identificar a diminuição do fluxo a ponto de gotejamento, eram realizadas a medição do volume e turbidez do lodo drenado. O geotêxtil tecido de massa por área 600 g/m² apresentou melhores resultados. A análise dos dados em relação ao líquido drenado foi essencialmente qualitativa para turbidez.

Figura 20 - a) “Mini leito” de drenagem utilizado por Reis (2011)). (b) despejo no “minileito” de drenagem utilizado por Reis (2011)

a)



b)



Fonte: Reis (2011).

Foram realizados ensaios posteriores com um protótipo similar ao da Figura 22. Ao todos foram feitos 6 ensaios variando o teor de sólidos inicial do lodo, com volume de lodo inicial de 220 litros e aproximadamente 50 cm de carga hidráulica. Esses ensaios indicaram que o tempo médio de remoção de água presente no lodo através da drenagem foi de aproximadamente quatro dias, sendo a duração total de 7 dias, compreendendo as fases de drenagem e de secagem. A Tabela 29 mostra a evolução do teor de sólidos ao longo do tempo.

Tabela 29 - Evolução do teor de sólidos nos ensaios realizados por Reis (2011)

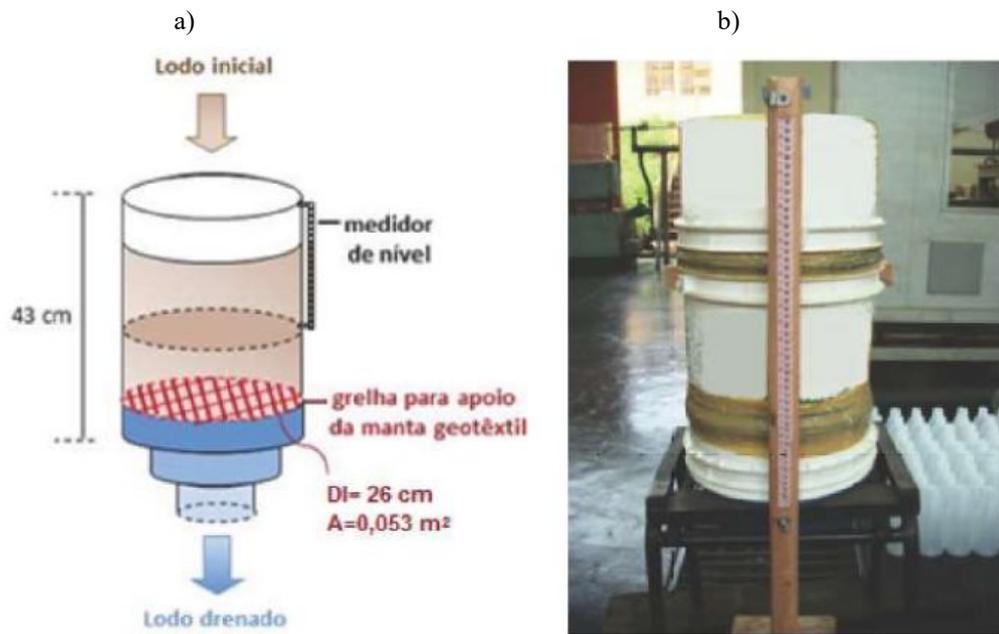
DIA (S) APÓS DESPEJO DE LODO NO LEITO (% de sólidos totais)												
	Bruto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
E01 Coberto S/cobertura	0,42	9,46	12,24	15,01	19,09	55,50	75,03	88,77	-	-	-	-
	0,42	7,38	8,95	12,27	15,08	26,21	31,34	56,59	-	-	-	-
E02 Coberto S/cobertura	0,20	8,18	14,64	20,69	37,44	63,87	89,89	-	-	-	-	-
	0,20	7,14	12,76	17,93	24,12	43,79	69,18	-	-	-	-	-
E03 Coberto S/cobertura	1,41	6,89	9,58	11,91	15,61	18,44	27,82	46,71	85,24	93,29	-	-
	1,41	5,67	8,19	9,72	13,08	16,43	21,00	38,76	79,47	88,58	-	-
E04 Coberto S/cobertura	1,20	7,98	9,47	12,32	23,12	37,69	56,45	83,02	-	-	-	-
	1,20	4,84	7,33	10,52	21,42	32,04	54,13	75,46	-	-	-	-
E05 Coberto S/cobertura	0,18	14,69	32,28	79,80	89,49	-	-	-	-	-	-	-
	0,18	7,81	10,71	20,17	79,47	-	-	-	-	-	-	-
E 06 Coberto S/cobertura	2,22	5,50	10,37	11,66	13,61	13,73	14,08	14,80	16,37	16,91	17,29	48,32
	2,22	3,34	6,01	6,27	8,71	7,03	8,25	9,07	8,37	10,08	11,94	14,75

Fonte: Reis (2011).

Quanto maiores foram os teores de sólidos iniciais do lodo bruto, maiores foram os tempos de secagem. Já, para menores teores de sólidos no intervalo observado, o autor recomenda que sejam realizados estudos mais abrangentes.

Silveira (2012) realizou dois tipos de ensaios de drenagem: escala de bancada e piloto, com a finalidade de verificar a qualidade de água drenada, comparando os dados obtidos com a Resolução CONAMA 357/05. Avaliou, também, vazão e volume dos drenados. Para os ensaios de bancada foi utilizado recipiente plástico cilíndrico (diâmetro de 0,26m e altura útil de 0,43m), com capacidade total de 30L. Os ensaios piloto foram realizados com LD composto por um tanque de polietileno com capacidade de 320 L, com grelha plástica para suporte de geotêxtil e tubulação de saída inferior para coleta do drenado. Nas Figuras 21 e 22 podem ser observados os LD em escala reduzida e piloto referentes à pesquisa.

Figura 21 - (a) esquema do Leito de drenagem em escala reduzida utilizado por Silveira (2012) (b) Foto do Leito de drenagem utilizado por Silveira (2012)



Fonte: Silveira (2012).

Figura 22 - (a) Esquema do Leito de drenagem em escala Piloto utilizado por Silveira (2012). (b) Foto do Leito de drenagem em escala piloto utilizado por Silveira (2012)



Fonte: Silveira (2012).

O autor utilizou a mesma TAS, porém com teor de sólidos totais iniciais distintos verificando tempos de drenagem diferentes entre os dois ensaios realizados para o mesmo lodo. Ademais, nos ensaios de bancada a qualidade do líquido drenado foi melhor, evidenciando que a escala adotada influencia nos resultados do drenado. Na Tabela 30 pode ser observado um resumo dos resultados obtidos nos quatro ensaios de desaguamento de lodo por LD.

Tabela 30 - Resultados dos ensaios de desaguamento por LD realizados por Silveira (2012)

Escala	Bancada		Piloto	
	Coagulante ETA	FeCl ₃	PAC	FeCl ₃
% ST inicial	1,5	1,6	0,91	1,27
TAS (kg/m ²)	7,5	7,5	7,5	6,5
Volume que atendeu à condição I (%)	78,00	91,00	66,00	84,00
Volume que atendeu à condição II (%)	80,00	91,00	69,00	89,00
Volume que atendeu à condição III (%)	76,00	89,00	62,00	71,00
Tempo de extinção da lâmina líquida (h)	41,00	43,00	27,00	30,00
%ST do fim da drenagem	15,70	13,19	12,9	11,2
%ST após secagem	75,4	82,5	16,6	30,2
Tempo de secagem (dias)	13	13	7	7

Fonte: modificado de Silveira (2012).

Santos (2012) realizou estudos em LD escala de bancada com a utilização de três geotêxteis, conforme mostra a Figura 23. Avaliou a vazão drenada, o volume drenado de água livre e a qualidade da água drenada através das variáveis cor e turbidez ao longo do tempo de drenagem. Foram realizados três ensaios em cada geotêxtil, com TAS de 1,75 kg/m², 3,5 kg/m² e 7,0 kg/m². Na Tabela 31 temos alguns resultados destes ensaios.

Figura 23 - (a) Esquema do Leito de drenagem utilizado por Santos, (2012). (b) Foto do Leito de drenagem utilizado por Santos (2012)



Fonte: Santos (2012).

Tabela 31 – Resumo dos resultados observados por Santos (2012)

Ensaio	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3		
Geotêxtil	RT-21	RT-26	RT-31	RT-21	RT-26	RT-31	RT-21	RT-26	RT-31
TAS (kg/m ²)		1,75			3,5			7	
Tempo de drenagem (h)		2			7			48	
% ST inicial					1,7				
% ST do fim do drenagem	9	8	9	10	9	10	9	10	10

Fonte: Santos (2012).

Conforme afirma o autor as diferenças nos teores de sólidos finais entre os três foram devido às variáveis climáticas. Ele concluiu ainda que o tempo de drenagem é proporcional à taxa de aplicação de sólidos do lodo inicial, indicando que a TAS de 3,5 kg/m² seria a mais apropriada para as condições da pesquisa realizada. Assim, quanto maior a TAS, maior o tempo de drenagem para um mesmo valor de ST inicial do lodo.

Em relação à fase de drenagem, nos primeiros 15 minutos de desaguentamento, os drenados apresentaram valores elevados de turbidez. Já, em relação à fase de secagem foram atingidos valores de ST% maiores aos 7 dias para menores TAS, justificado pela transferência de calor.

Kuroda *et al.*, (2014) realizaram ensaios em escala piloto, resultando na extinção da lâmina líquida em 1 dia. Após 7 dias do ensaio, foi obtido teor de sólidos totais de 18,3%, (teores da mesma ordem de grandeza que as obtidas em técnicas mecânicas). Porém, ambos os estudos (SILVEIRA, *et al.*, 2015; KURODA *et al.*, 2014) foram realizados com lodo bruto com apenas dois teores de sólidos totais (5% e 1,6%) e uma taxa de aplicação de sólidos (TAS) de 7,5 Kg/m², para a mesmo geotêxtil com massa por área de 600g/m², a mesma especificada por Cordeiro (2001) e utilizada por Barroso (2007) e Achon *et al.*, (2008).

Santos *et al.*, (2014) realizaram ensaios de LD em escala laboratorial com lodo de ETA e teor de sólidos totais de 1,7% e três taxas de aplicação de sólidos (TAS) de 1,75; 3,5 e 7,0 Kg/m², variando o volume de lodo aplicado no LD (diâmetro 150 mm) em 1,8 litros, 3,6 litros e 7,2 litros. Os melhores resultados foram para a TAS de 3,5 Kg/m², concluindo que os resultados obtidos comprovam a grande eficiência dos sistemas de LD no desaguamento de lodo de ETA.

Minatel (2021) estudou a influência de múltiplos fatores na etapa de drenagem de água livre no desaguamento de lodo de ETA em LD, tais como: teor de sólidos do lodo, altura da camada de lodo, taxa de aplicação de sólidos (TAS) e diferentes tipos de geotêxteis. O autor construiu um sistema de LD em escala de bancada (Figura 24), usando 6 tipos diferentes tipos de geotêxteis (4 não-tecidos de massa por área 300, 400, 500 e 600 g/m² e 2 tecidos); 6 teores de sólidos totais (ST) do lodo bruto (0,5; 1; 1,5; 2,0; 2,5 e 3%) e 5 alturas de camada de lodo (10, 20, 30, 40 e 50cm) sem adição de polímeros.

A análise dos resultados permitiu concluir que a estabilização do pré-filtro formado pela sedimentação dos sólidos presentes no lodo sobre o leito teve ação preponderante no processo de drenagem em relação ao tipo de geotêxtil. Além disso, o teor de ST do lodo bruto tem relação indireta com a porcentagem de líquido drenado final; os leitos com maiores TAS apresentaram porcentagens superiores de líquido drenado com boa qualidade e tempo maior para o fim do fluxo de água livre; as drenagens em leitos com pequena altura de camada de lodo e com baixos teores de ST foram pouco eficientes em promover líquidos drenados de boa qualidade; a abertura de filtração do geotêxtil tecido esteve relacionada à promoção de drenados com valores elevados de cor aparente.

Figura 24 - Equipamento em escala de bancada construído para pesquisa de Minatel (2021)



Fonte: Minatel (2021).

Mortara (2011) avaliou o tratamento de lodo de ETE, no qual é utilizado o sulfato de alumínio como agente coagulante, aplicado ao sistema de leito de drenagem utilizando polímero scatiônicos como pré-tratamento, com vistas ao aumento da eficiência.

O autor observou que o tratamento prévio com polímeros catiônicos possibilitou menor tempo de drenagem, produziu efluente drenado de melhor qualidade, mas pouco interferiu no tempo de secagem. Além de determinar o polímero e sua dosagem ideal, destacou que o excesso desse reagente reduz a vida útil do geotêxtil, em razão do deleto promover maior viscosidade da água residuária e conseqüentemente favorecer a colmatação do geotêxtil.

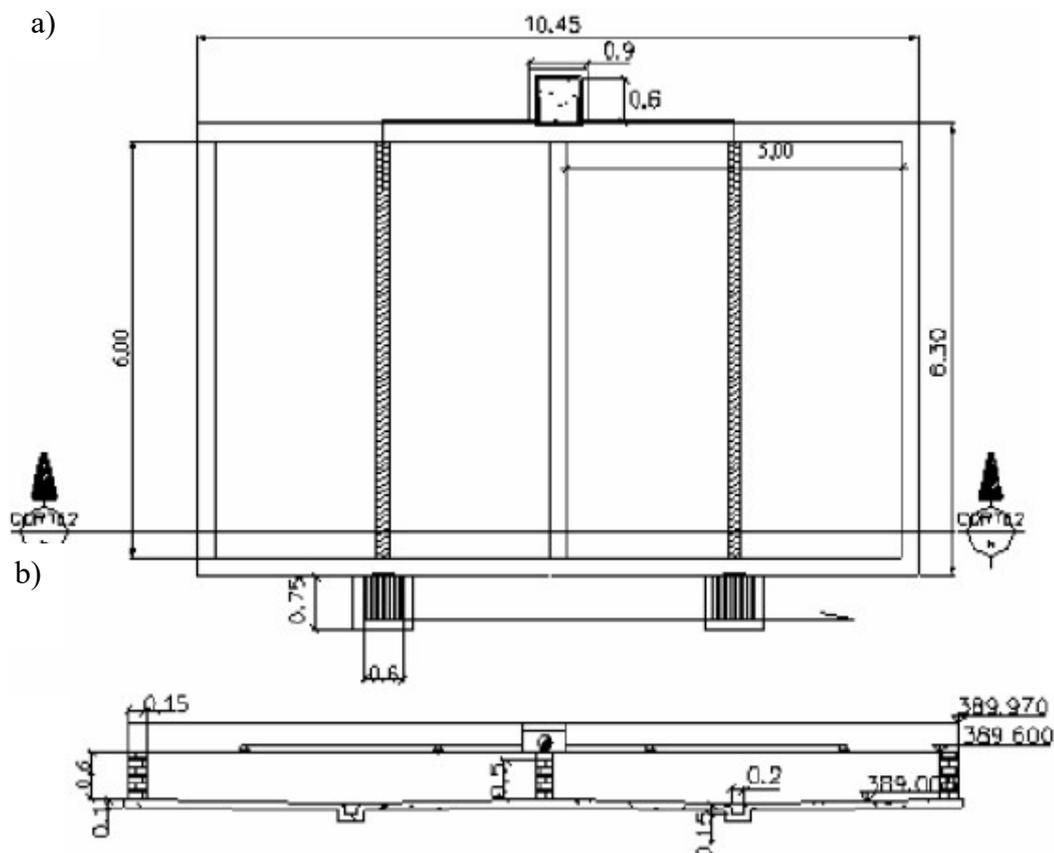
2.11 Leito de Drenagem: pesquisas em escala real

As pesquisas utilizando LD em escala real ainda são incipientes, porém, é importante destacar os autores que obtiveram resultados relevantes e que podem contribuir de alguma forma para estudos de maior abrangência.

Fontana (2004), no município de Cardoso-SP, construiu e estudou um LD em escala real, com área de 60 m² (dois módulos de área 30 m²) e altura de 0,50 m, conforme mostram as Figuras 25a e 25b, implantado antes de um sedimentador. O lodo utilizado para o desaguamento provinha dos decantadores e da ALAF que passava por um sedimentador. Foi utilizado um geotêxtil não-tecido de poliéster, de referência comercial MT 600 da Maccaferri, abertura de 0,06 a 0,13 µm e espessura de 4,4 mm. A

ETA na época do estudo atendia uma população de 4920 habitantes, com capacidade de tratamento de 25L/s.

Figura 25 - Leito de drenagem construído por Fontana (2004). a) Planta dos módulos do Leito de Drenagem. b) Corte da estrutura do Leito de Drenagem



Fonte: Fontana (2004).

Os resultados apresentaram alto desempenho no desaguamento com redução de 98 % do volume de resíduos. Os drenados apresentam elevada qualidade; o LD foi efetivo para a remoção dos metais, adequando-se aos limites impostos pela Resolução CONAMA 357/2005.

O autor destacou alguns fatos relevantes observados nos ensaios:

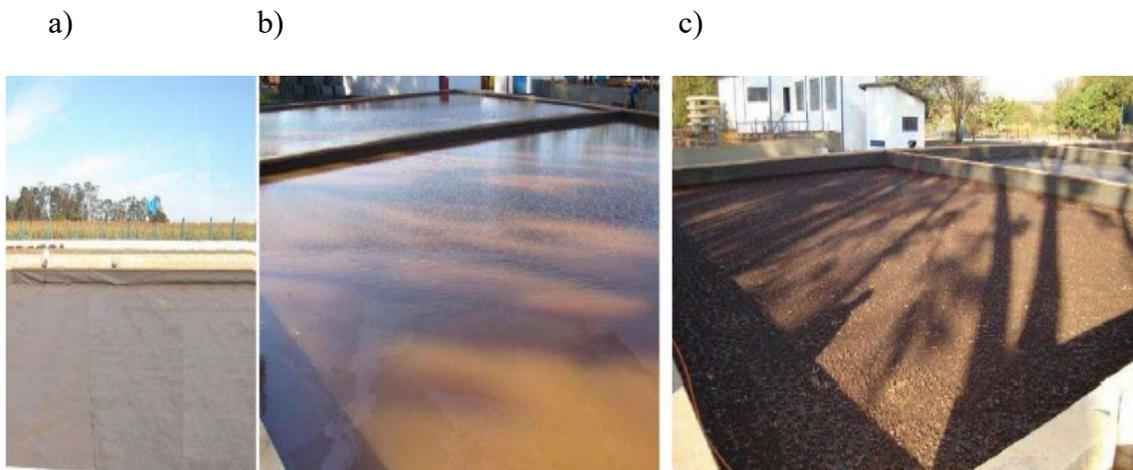
- ✓ houve variação do teor de sólidos ao longo do tempo para dois lançamentos sucessivos;
- ✓ no primeiro ensaio o lodo aplicado possuía teor de sólidos médio inicial de 2,51% e teor de sólidos final de 68,90%;
- ✓ ocorreram precipitações 21 dias após o primeiro lançamento, porém, elas aconteceram posteriormente ao aparecimento das rachaduras na torta de lodo provenientes da retenção dos sólidos, já na fase de secagem.

- ✓ a ocorrência de precipitações sob o leito apenas interferiu na eficiência de desaguamento, em termos de teor de sólidos do lodo desaguado, porém, essa intervenção só foi observada nos primeiros dias após o lançamento do lodo, anteriormente a exposição do geotêxtil, devido à retração dos sólidos (lodo desaguado), ocorrida no início da fase de secagem;
- ✓ no segundo ensaio o lodo aplicado possuía teor de sólidos médio inicial de 2,84%, e teor e sólidos final de 24,8% após 32 dias.
- ✓ nos primeiros 6 dias do segundo lançamento, ainda não havia sido observada rachaduras na massa de sólidos, que são esperadas no início da fase de secagem;
- ✓ atribuiu a diferença de teor de sólidos finais à frequência de chuvas no período inicial do lançamento no ensaio 2.

Cordeiro *et al.*,(2014) após 10 anos da implantação do LD na ETA de Cardoso-SP realizaram visitas técnicas e destacaram que um dos ganhos do LD foi a troca do geotêxtil após uma década de utilização. Isso mostrou a durabilidade do geotêxtil não-tecido na drenagem e filtração das partículas de lodo aplicados no LD.

Reis (2011) estudou o LD implantado na ETA de Guaíra-SP, (com dimensões de 20m x 13m x 0,5m de altura), que na ocasião tratava uma vazão de 130 L/s. A altura máxima do resíduo dentro dos leitos era de 0,40m, que ao serem desaguados resultavam em alturas de aproximadamente 2,0 a 3,0 cm. O teor de sólidos totais do lodo bruto era de 1 a 2% e o tempo médio de exposição do lodo no LD para remoção de água variava entre 40 e 45 dias. A Figura 26 mostra fotos do LD implantado na ETA de Guaíra-SP.

Figura 26- Leito de drenagem ETA Guaíra - (a) Disposição do Geotêxtil. (b) Leito de drenagem com aplicação do lodo. (c) Lodo Seco



Fonte: Reis (2011).

O autor estudou, também, um LD implantado na ETA de Guanhães-MG com capacidade média de tratamento de água de 60 L/s. Esta ETA possuía quatro unidades de LD instaladas e em funcionamento (dimensões 7,5 m de largura, 16,0 m de comprimento e aproximadamente 1,0 m de profundidade), com capacidade volumétrica total de 120 m³ cada. O lodo aplicado nos LD provinha apenas dos decantadores (porém não foi especificado seu teor de sólidos iniciais) e a água drenada não voltava para o início do tratamento. Na época que não ocorriam precipitações, o tempo de exposição do lodo nos LD era de 30 a 45 dias para sua total remoção e início de nova drenagem.

Lustosa (2017) na cidade de Colmeia – TO desenvolveu e instalou um sistema de reutilização da ALAF em uma estação de tratamento por filtração direta, que operava com uma vazão de 17 L/s, 21 horas por dia. A cidade tinha na época 6500 habitantes,

Este sistema foi composto pelo tanque de sedimentação da ALAF e do LD com a utilização de geotêxtil para a separação da parte sólida do resíduo, o que possibilitou recirculação da água para o início da estação. O autor não mencionou a concentração de sólidos da ALAF aplicada sob o leito, mas indicou uma camada inicial com altura de 25 cm.

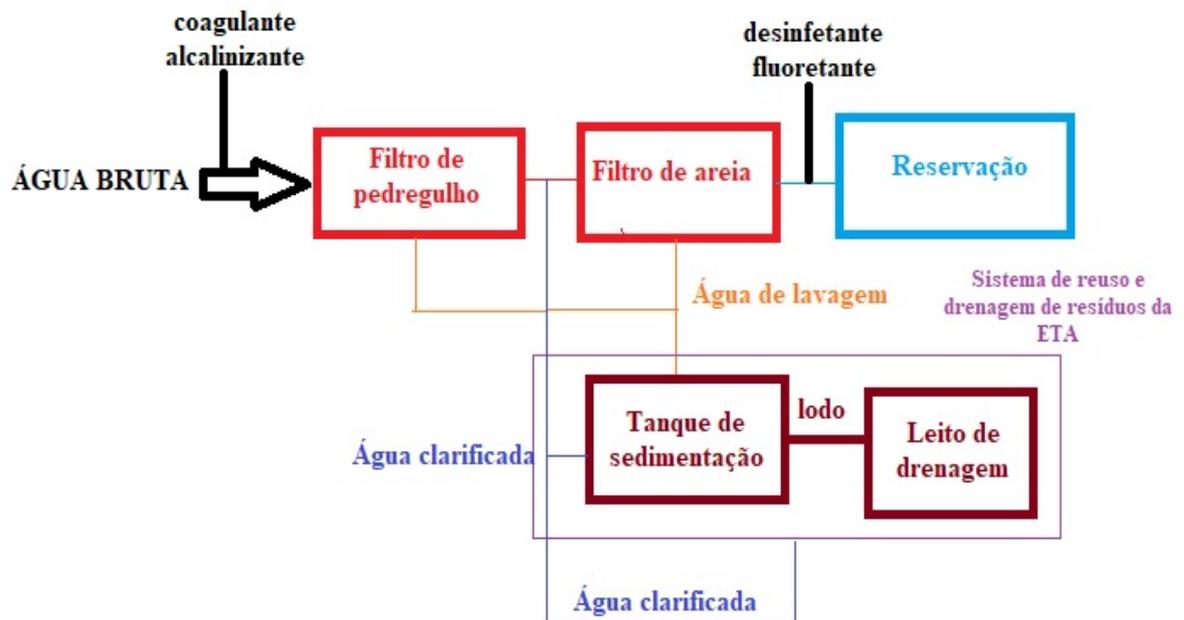
A Figura 27 ilustra o fluxograma do sistema de reaproveitamento e drenagem dos resíduos.

A implantação do LD promoveu:

- ✓ reúso dos drenados, com diminuição da água bruta recalçada;
- ✓ redução de custos com eletricidade;
- ✓ redução dos produtos químicos do tratamento;
- ✓ tempo médio de drenagem de 2 horas;
- ✓ teores de sólidos de lodo de 15% após 2 dias;
- ✓ tempo médio de secagem de 5 dias com teor de sólidos de 30%.

O custo total da implantação do sistema foi de R\$18,30 por habitante atendido pela ETA (calculado no ano base 2014), a redução de gastos com eletricidade pagaria a implementação do sistema em 20 anos.

Figura 27 - Fluxograma de implantação de sistema de reuso e drenagem de resíduos de ETA com filtração direta da cidade Colmeia-TO



Fonte: adaptado de Lustosa (2017).

3. Material e Métodos

As etapas correspondentes a este item foram descritas através de um fluxograma (Figura 28), com o intuito de esquematizar de forma mais clara a metodologia e os procedimentos adotados para realização dessa pesquisa. Os itens descritos resumidamente foram explanados em cada subtópico seguinte.

Sinteticamente, a pesquisa utilizou o lodo e a água coletados no decantador, de uma estação de tratamento de água (ETA). Destaca-se que não foi coletada a água de lavagem de filtros (ALAF) apesar de ser considerada um resíduo sólido. Após, as respectivas coletas foram realizadas análises de teores de sólidos desses materiais. Como o lodo apresentou alta concentração de sólidos, necessitou ser diluído com a água do decantador para preparação da mistura, correspondente à concentração fixa de 2 % de sólidos, a fim de serem aplicadas no protótipo de leitos de drenagem.

Os protótipos dos leitos de drenagem foram montados e os ensaios realizados foram de dois tipos: 1) ensaio de desaguamento apenas com o lodo na respectiva concentração de 2%, caracterizado como SP (sem polímero) com alturas de camada de lodo equivalentes a H10, H30 e H50 cm. Para os ensaios de desaguamento com polímero (CP), inicialmente foram selecionados polímeros catiônicos e aniônicos para realização de ensaios de cone com diferentes dosagens, para cada tipo de geotêxtil utilizado, com o intuito de selecionar qual polímero seria aplicado nos protótipos de leito de drenagem.

Os geotêxteis escolhidos para compor o sistema como camada filtrante para as duas configurações de ensaio (SP e CP) foram três não- tecidos de massa por unidade de área de 400, 600 e 900 g/m² e um tecido (GT80), respectivamente.

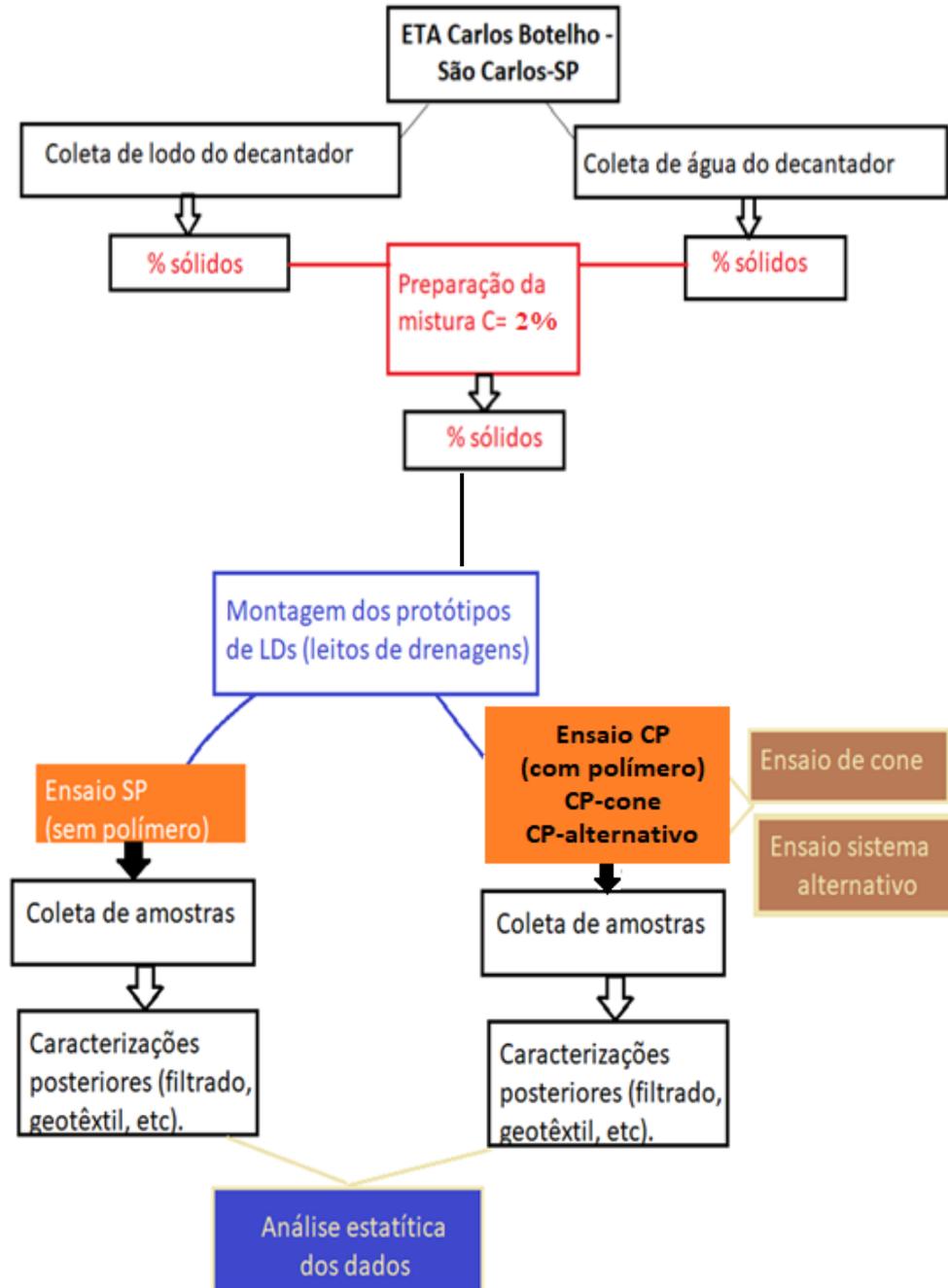
Os polímeros e dosagens selecionados nos ensaios de cone foram aplicados ao sistema de LD, nas mesmas alturas dos ensaios SP (H10, H30 e H50 cm). O critério para seleção foi maior volume filtrado como pré-requisito principal, tendo a turbidez como requisito secundário. Esses ensaios foram caracterizados como CP-cone.

Ainda assim, com o intuito de estudar outro método de seleção de polímeros para serem aplicados ao sistema foi utilizado um caracterizado como “alternativo” para seleção de polímeros e novos ensaios caracterizados como CP-alternativo foram realizados no sistema (protótipo) de LD montado, com as mesmas alturas de camada de lodo e geotêxteis.

Para todas as configurações de ensaios realizados (SP, CP-cone e CP-alternativo) foram coletadas amostras para caracterizações posteriores (no filtrado, no geotêxtil, etc),

com o intuito de avaliar as qualidades dos líquidos filtrados nos geotêxteis na etapa de desaguamento. A descrição de cada etapa foi detalhada nestes tópicos.

Figura 28 - Fluxograma com as etapas constituintes da pesquisa



Fonte: autora.

3.1 Coleta de lodo e água do decantador

Foram coletados aproximadamente 200 litros de lodo diretamente do decantador durante a realização do processo de limpeza na Estação de Tratamento de Água (ETA) Carlos Botelho, localizada na Avenida Doutor Carlos Botelho, nº 1201, no município de São Carlos- SP. A Estação é administrada pelo SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos. A Figura 29 ilustra o procedimento de coleta do lodo do decantador.

Além do lodo, foram coletados 600 litros de água diretamente do decantador em operação a fim de diluir o lodo com alta concentração de sólidos para composição da mistura.

Figura 29 - Coleta de lodo no decantador



Fonte: autora.

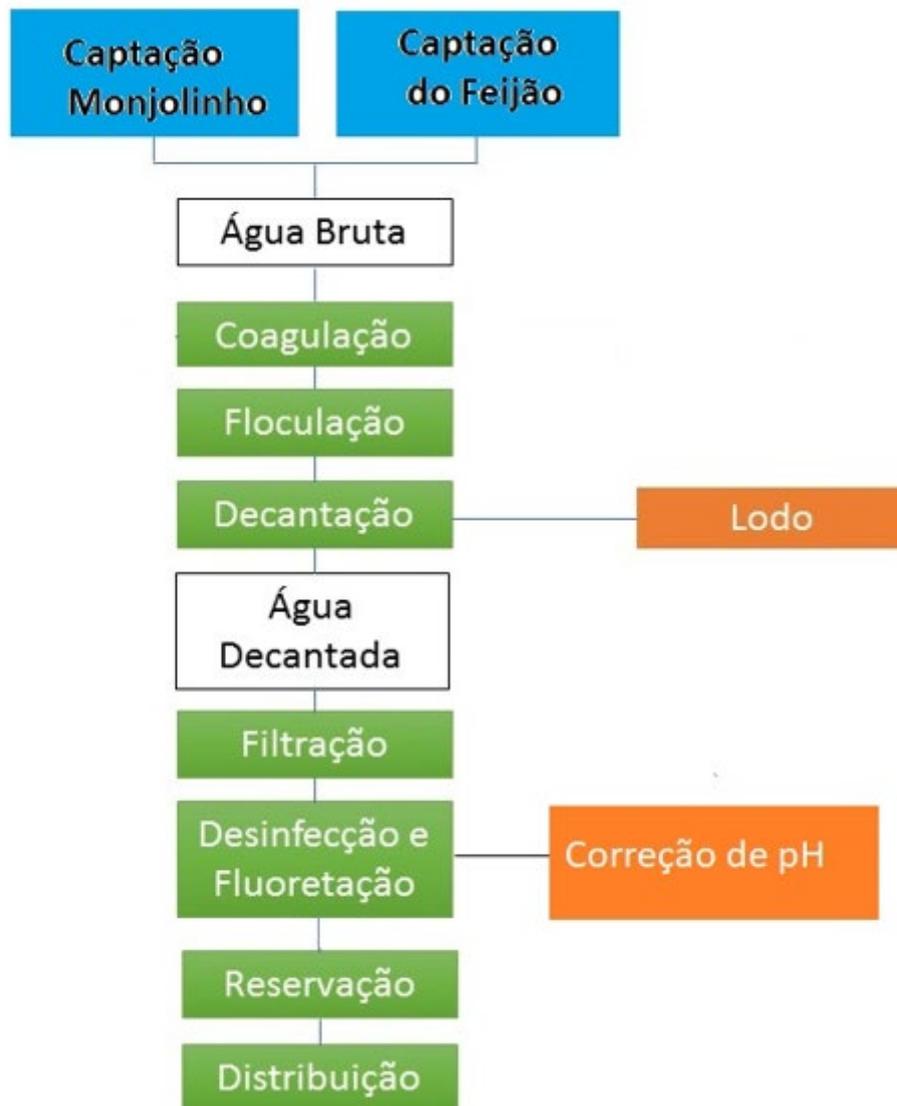
A captação de água bruta nessa ETA se dá de forma superficial a partir de dois mananciais: Córrego do Monjolinho e Ribeirão do Feijão.

A ETA possui tecnologia de tratamento de água do tipo convencional de ciclo completo, ou seja, o tratamento da água advindo dos mananciais contempla as seguintes etapas: coagulação; com sulfato de alumínio, floculação; sedimentação; filtração; desinfecção, com cloro; fluoretação com fluorsilicato de sódio e correção de pH com hidróxido de cálcio. Após essas etapas a água tratada é reservada e distribuída aos bairros atendidos. Todo o lodo produzido nos decantadores é encaminhado à ETE.

Atualmente, a vazão média tratada é de 480L/s, com capacidade máxima de até 540L/s. (SAAE, 2021).

A Figura 30 ilustra os processos e operações da ETA Carlos Botelho.

Figura 30 - Etapas correspondentes ao tratamento de água da ETA Carlos Botelho



Fonte: autora.

3.2 Caracterização dos sólidos do lodo e preparação das amostras

Para a caracterização dos sólidos foi realizado a análise do teor de sólidos totais do lodo e da água. A caracterização dos sólidos foi dividida em etapas:

- 1) Primeiramente foi realizada uma agitação rigorosa das amostras coletadas na ETA (lodo e água do decantador);
- 2) Retirada de uma alíquota correspondente a 300 ml de cada amostra para realização da análise de sólidos totais em triplicata;

- 3) Realizada a pesagem em balança analítica das cápsulas de porcelana limpas que foram acondicionados na estufa para esterilização e anotadas as taras, identificadas como P0;
- 4) Foram colocados 100 mL de amostra em cada cápsula de porcelana e encaminhadas para estufa à 105 °C;
- 5) Após 24 horas, foram retiradas as cápsulas de porcelana da estufa, aguardado esfriar e realizada a pesagem da cápsula juntamente com os sólidos, identificados como P1.
- 6) O teor de sólidos (%) foi obtido pela diferença entre P1 e P0, divididos pelo volume de cada cápsula multiplicado por 100.

A partir do teor de sólidos do lodo, ele foi diluído com água do decantador, a fim de ajustar o valor a 2%.

O teor de sólidos no lodo após a diluição foi calculado a partir da Equação 6. O volume de mistura produzido na concentração fixa de 2% era de 60 litros, volume correspondente a três bateladas ou uma triplicata destes ensaios.

$$C_{diluido} = \frac{(V_{LODO} \times C_{LODO} + V_{ÁGUADEC.} \times C_{ÁGUADEC.})}{(V_{LODO} + V_{ÁGUADEC.})} \quad (6)$$

Onde:

$C_{diluido}$ é a concentração fixa de 2%, após a diluição do lodo com água do decantador;

V_{LODO} é o volume de lodo em litros calculado para obtenção da mistura na concentração de sólidos de 2%;

C_{LODO} é a concentração de lodo bruto correspondente ao valor de 4,6%;

$V_{ÁGUADEC.}$ é o volume de água do decantador em litros calculado para obtenção da mistura na concentração de sólidos de 2%;

$C_{ÁGUADEC.}$ é a concentração de água do decantador correspondente ao valor de 0,0165%.

O critério para a aceitação da amostra (mistura) e realização do ensaio foi a variação de uma casa decimal para mais ou para menos com relação a porcentagem de sólidos requerida.

Minatel (2021) realizou ensaios com diferentes teores de sólidos totais no lodo, 0,5%; 1%; 1,5%; 2%, 2,5% e 3%. Fontana (2004) e Reali (1999) também trabalharam com valores semelhantes em seus estudos. Ressalta-se que a concentração de sólidos

fixa (% ST) de 2% contempla essa gama de variações e é característica do valor encontrado nas ETAs de ciclo completo em escala real, sejam elas convencionais ou de alta taxa.

Foi calculada a taxa de aplicação de sólidos do lodo, referida como TAS, de acordo com a equação 7. Para este cálculo, utilizou-se o teor de sólidos inicial do lodo bruto, o volume de lodo e a área superficial de drenagem.

A altura da camada de lodo no leito de drenagem também pode influenciar a TAS de maneira indireta.

$$TAS = \frac{V \cdot (\frac{\%ST}{100})}{A} \cdot \rho \quad (7)$$

Sendo:

TAS (kg.m⁻²) – Taxa de aplicação de sólidos.

%ST – Adimensional

A (m²) – Área de aplicação do lodo.

V (m³) – Volume do lodo

ρ (kg.m⁻³) – Massa específica do lodo = 1000kg.m⁻³

Conforme Silveira (2012), considerou-se para efeito de cálculo densidade relativa igual a 1,0.

A taxa de aplicação de sólidos (TAS) foi variável para um teor de sólidos de 2%, conforme Tabela 32 com as alturas da camada de lodo nos protótipos de LD de H10, H30 e H50 cm.

Tabela 32 - Cálculo da TAS pra concentração de 2%.

ST (%)	H da camada de lodo no LD (cm)	Volume calculado (L)	TAS calculada (kg.m ⁻²)
2	10	1,85	2
	30	5,60	6
	50	8,52	10

Fonte: autora

Nas misturas iniciais produzidas foram realizadas análises para caracterizações complementares, como: pH, sólido em suspensão totais (SST) e sólidos dissolvidos totais (SDT), seguindo os métodos preconizados pela APHA/AWWA/WEF (2018).

Em relação ao lodo bruto, a série de metais foi quantificada por Minatel (2021). Os seus resultados foram utilizados para esta caracterização, de acordo com o método da APHA/AWWA/WEF, 2018, EAA e estão no tópico Resultados, subtópico - 4.2. Também foram realizados o pH e teor de sólidos.

Uma síntese dos ensaios de caracterização realizados tanto na mistura inicial como no lodo bruto pode ser observada na Tabela 33, conforme recomendado por Barroso (2007).

Tabela 33 - Métodos usados na caracterização dos lodos de ETA e mistura inicial utilizados na pesquisa recomendados por Barroso (2007)

Material	Propriedades	Método
	SST e SDT	
Mistura inicial	pH	
Lodo bruto	Metais (Al, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn)	APHA/AWWA/WEF, 2018, EAA
	pH	
	Teor de sólidos	

Fonte: autora

3.3 Descrição do ensaio de desaguamento do lodo

A fim de atingir os objetivos propostos, foi estudado um sistema de ensaios que avalia a eficiência de desaguamento de lodo de ETA em leitos de drenagem (LDs), utilizando diferentes geotêxteis. Destaca-se que este sistema foi utilizado por Minatel (2021), porém, o autor estudou o desaguamento do lodo sem a adição de polímeros.

A eficiência do desaguamento foi avaliada utilizando quatro tipos de geotêxteis, sendo três não-tecidos e um tecido. Para cada geotêxtil, foram realizados ensaios com teor de sólidos de lodo (% ST) e TAS variáveis, conforme já descrito.

Os ensaios foram conduzidos com o intuito de avaliar a influência de diversos fatores na eficiência de desaguamento de lodo de ETA em LD, tais como: a condição inicial do lodo bruto, a altura da camada de lodo (carga hidráulica), o tipo de geotêxtil utilizado e a influência da aplicação de polímeros na eficiência ou não dos sistemas de LD e qualidade dos drenados.

3.3.1 EQUIPAMENTO PARA OS ENSAIOS – INSTALAÇÃO

Este aparato experimental simulou um leito de drenagem em escala reduzida. Semelhante ao que foi proposto também por Silveira (2012) e Santos (2012) em seus leitos de drenagem, mas, neste caso, foi estudada apenas a existência de fluxo normal ao plano do geotêxtil.

Corroboram para a utilização de LD em escala reduzida, ensaios de desaguamento em Leitos de Drenagem em escala laboratorial estudados por Minatel (2021), Barroso (2007), Reis (2011), Silveira (2012) e Santos (2012). Esses autores concordam que estudos em escala de bancada são essenciais na condução de resultados concretos, além, de servirem como subsídio para a elaboração de projetos de LD em escala real. Destacam ainda, que os LD em escala reduzida devem representar o mais fielmente possível os fenômenos da drenagem observados em LD em escala real.

Nos experimentos de Silveira (2012), Reis (2011) e Barroso (2007) foram observadas a influência da disposição do geotêxtil na lateral do confinamento do lodo durante a drenagem, além da diferença nos tempos de drenagem e qualidade do drenado nos ensaios com os mesmos parâmetros comparando o leito piloto e o leito em escala reduzida.

Minatel (2021) observou um tempo de drenagem 50% mais rápido no protótipo piloto com possibilidade de escoamento no plano da manta.

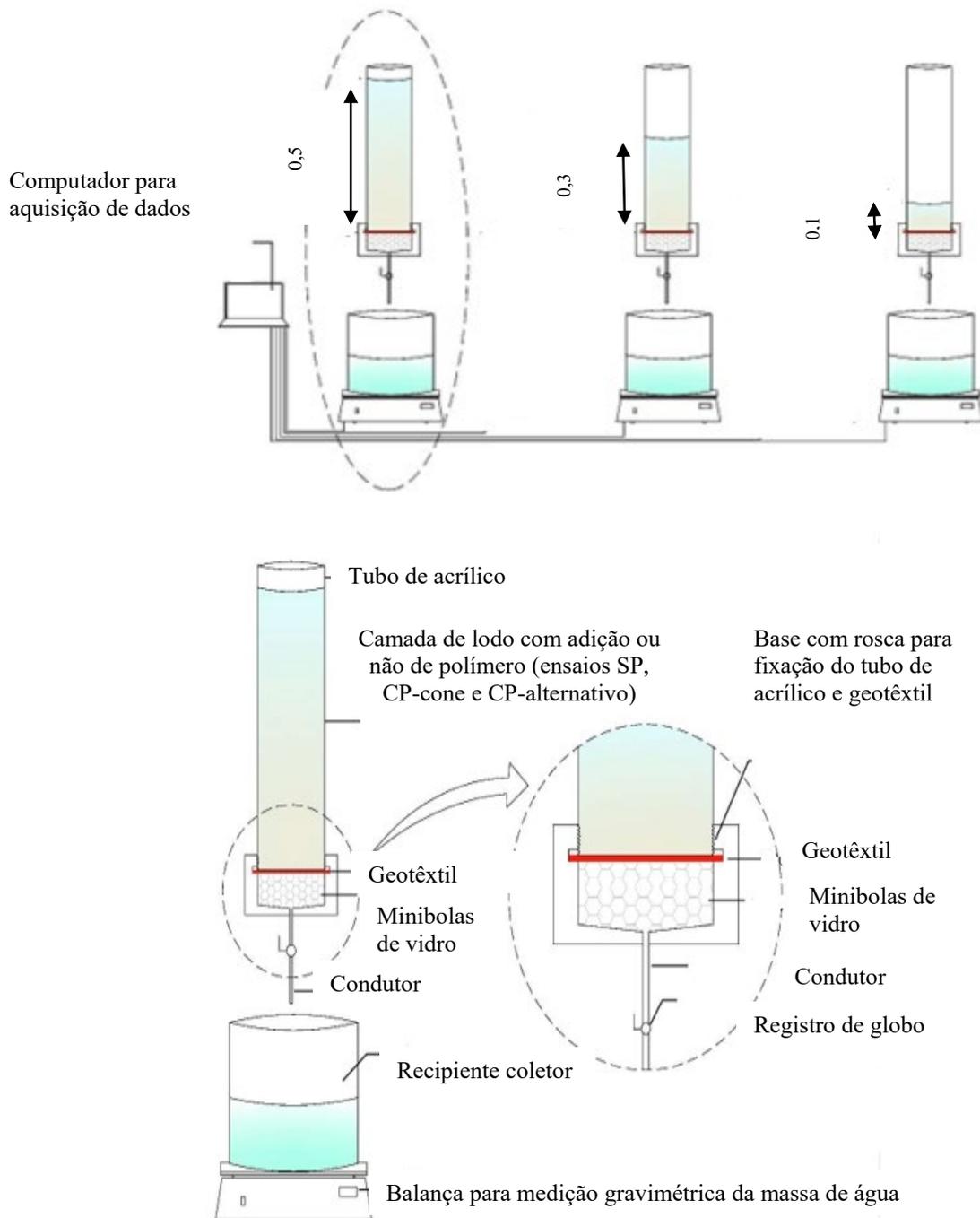
3.3.2 PROTÓTIPO DO SISTEMA DE LEITO DE DRENAGEM

Inicialmente, o sistema de Leitos de Drenagem foi composto por três tubos de acrílico ($D=150\text{mm}$) preenchidos com minibolas de vidro (tipo bolas de gude) no fundo (altura de 4 cm) que serviram como meio suporte para o geotêxtil e percolação da água livre drenada. Após, a realização de alguns ensaios e para dar agilidade aos restantes, foram utilizados mais dois tubos de acrílico, totalizando cinco.

O tubo de cada LD conduziu o fluxo apenas do lodo no ensaio SP, e o lodo mais o polímero nos ensaios CP-cone e CP-alternativo, para um recipiente colocado sobre uma balança que enviava dados de variação de massa ao sistema de aquisição de dados.

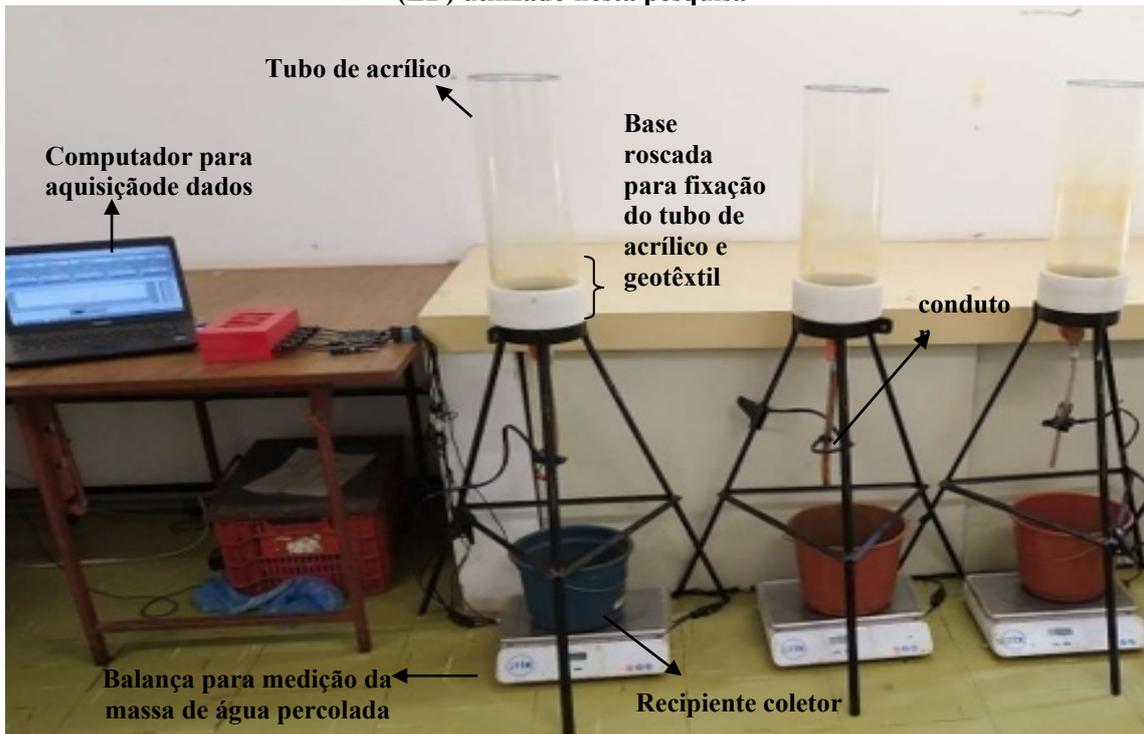
Nas Figuras 31 e 32, tem-se o esquema e a fotografia, respectivamente, do Sistema de Leito de Drenagem (LD) utilizado, com medição automatizada e aquisição de dados de vazão, para desaguamento de lodo de ETA. A Figura 33 mostra a fotografia da proposição posterior com os 5 tubos de acrílicos em funcionamento.

Figura 31- Esquema de instalação e detalhe do Sistema de desaguamento de lodo em Leito de Drenagem (LD)



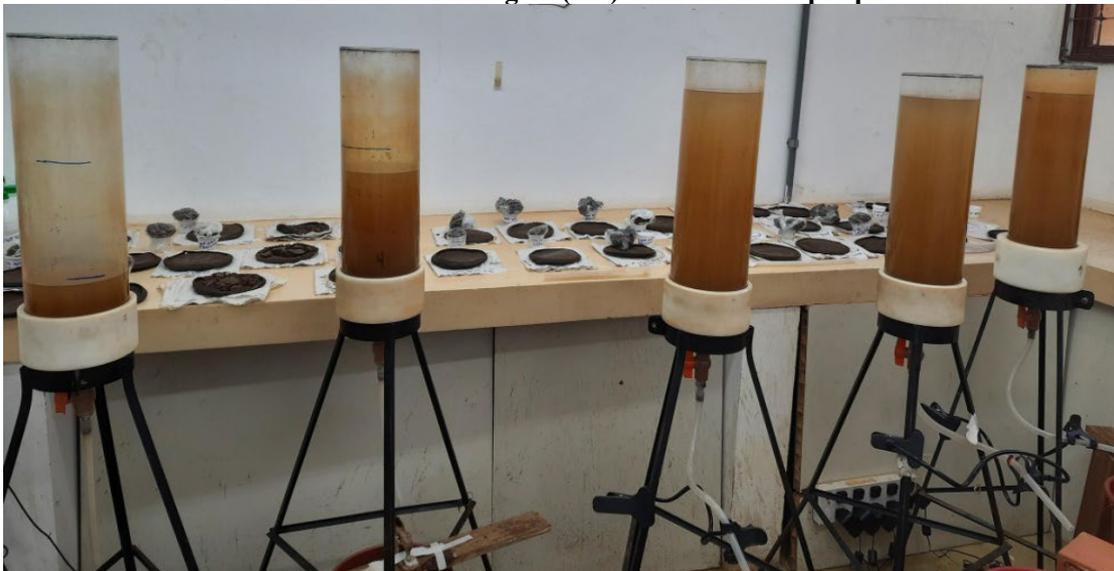
Fonte: adaptado de Minatel (2021).

Figura 32 - Foto da preparação do Sistema de desaguamento de lodo em Leito de Drenagem (LD) utilizado nesta pesquisa



Fonte: adaptado de Minatel (2021).

Figura 33 - Foto dos cinco tubos de acrílico em funcionamento do Sistema de desaguamento de lodo em Leito de Drenagem (LD) utilizado nesta pesquisa



Fonte: autora

3.3.3 Ensaio sem Polímero (SP)

Os ensaios apenas com o lodo foram denominados SP. Para eles inicialmente, eram preparadas misturas (no teor de sólidos de 2%, e volume de 60

litros). Este volume foi acondicionado em bombonas de 200 litros e era correspondente a três bateladas ou uma triplicata dos ensaios, ou seja, 9 ensaios.

Inicialmente, os tubos de acrílico e as bolas de gude eram lavados. Os geotêxteis eram cortados em $D=150\text{mm}$ e eram adicionadas fitas adesivas de polietileno ao redor dos moldes para dar completa vedação quando estivessem instalados no sistema de LD. Essas amostras de geotêxtil também foram pesadas em balança analítica (massa inicial do geotêxtil).

Com o sistema estrutural de LD já preparado, o programa de aquisição de dados era ligado, assim como as balanças que realizavam a medição da massa de água. A mistura, então, era agitada, acondicionada em um recipiente onde a quantidade de lodo para cada altura (H10, H30, H50 cm) já estava demarcada.

O ensaio era iniciado, pesando-se o conteúdo que estava no recipiente mais a sua tara e anotava-se este valor. Agitava-se, novamente o conteúdo e, posteriormente, despejava-se manualmente o mesmo nos tubos de acrílico. O recipiente, então, era lavado, pesado e colocado sobre a balança. Ao abrir o registro de globo, o desaguamento era iniciado e contabilizado através da balança.

Ao final do ensaio, os volumes de filtrado nos baldes (amostra final) eram acondicionados em recipientes plásticos ($V=1\text{L}$) para realização de caracterização posteriores.

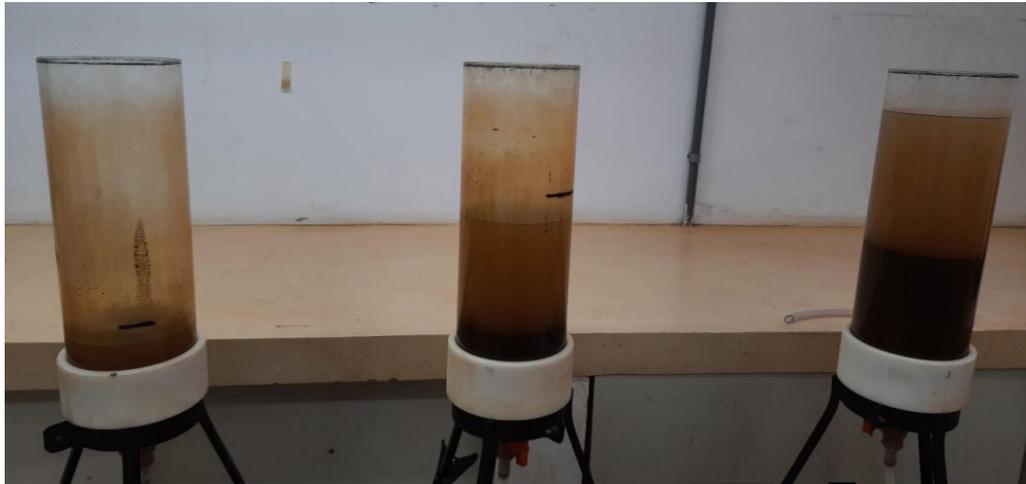
O material retido sobre o geotêxtil foi pesado e seco em estufa para obtenção de teor de umidade e massa retida.

O critério de parada estabelecido para ensaios SP foi de 72 horas (3 dias). Cabe ressaltar que Minatel (2021) em seu estudo utilizou tempo de duração de 48 horas (2 dias). Foi observado para H50 e alguns geotêxteis estudados, que o lodo não foi completamente desaguado no tempo estipulado (72 horas), assim, tomou-se cuidado de retirar amostras de água antes da passagem pelas camadas filtrantes, sendo realizadas análises posteriores para comparação se a água drenada era semelhante a água sobrenadante, por exemplo.

Na Figura 34a, têm-se a fotografia de um ensaio SP utilizando geotêxtil de massa por unidade de área de 400 g/m^2 , nas alturas de H10, H30 e H50 cm e um exemplo para H50 após a finalização do ensaio ($t = 72\text{h}$), sendo observado o sobrenadante. (Figura 34b).

**Figura 34 - Fotografia de ensaio SP a) com H10, H30 e H50 cm (da esquerda para a direita)
b) sobrenadante para H50 cm**

a)



b)



Fonte: autora.

3.3. 4 ENSAIO COM POLÍMERO (CP)

A descrição dos ensaios realizados com polímeros, caracterizados como CP foi dividida em subtópicos (seleção dos polímeros; descrição do ensaio de cone; ensaio CP-cone; descrição do ensaio alternativo; ensaio CP-alternativo) para melhor compreensão da metodologia utilizada nesta etapa.

3.3.4.1 SELEÇÃO DOS POLÍMEROS

Conforme as experiências de Souza (2016) e Mortara (2011), somadas a lacuna de estudos com a utilização de polímeros no condicionamento dos lodos de ETAs, decidiu-se investigar quais tipos poderiam ser utilizados para aplicação em sistemas de LD, com o intuito de melhorar a eficiência do desaguamento e, também, a qualidade do filtrado final. Para a presente pesquisa, foram selecionados polímeros catiônicos e aniônicos, em diferentes concentrações e dosagens, a fim de testar a interação deles com o lodo nos ensaios de cone e reproduzidos nos protótipos de LD com a utilização de diferentes geotêxteis.

Ao todo, foram testados quatro polímeros, sendo dois deles aniônicos e dois catiônicos, cujas características são mostradas na Tabela 34. Os polímeros utilizados foram cedidos pela empresa química Kemira.

Tabela 34 - Características dos polímeros testados

Referência comercial	Natureza química	Aparência	Carga relativa	Densidade aparente (kg/litro)	Peso molecular (milhões)	pH, solução a 0,5 % a 25°C	Viscosidade Brookfield *(CPS) 1,0 a 5,0g/L - 25°C	Acondicionamento e venda
A-110 HMW	poliacrilamida aniônica	pó granular esbranquiçado	baixa	0,80	muito alto	7-9	0,10% - 200 0,25% - 400 0,5% - 950	sacos de 25 a 750 kg
A-130 HMW	poliacrilamida aniônica		média	0,83		7-9	0,10% - 250 0,25% - 550 0,5% - 1100	
C-495 HMW	poliacrilamida catiônica		média	0,72		3-5	0,10% - 160 0,25% - 430 0,5% - 950 0,1% - 2100	
C-496 HMW	poliacrilamida catiônica		alta	0,75		3-5	0,10% - 180 0,25% - 470 0,5% - 1000 0,1% - 1300	

*centipoise (cP) é um milipascal segundo (mPa·s) em unidades SI.

Fonte: autora

3.3.4.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE CONE

O teste de cone foi aplicado para selecionar qual e/ou quais polímeros seriam utilizados para os diferentes geotêxteis ensaiados (GTNT400, 600, 900 e GT80). Esses resultados foram replicados no sistema de protótipo de LD, adicionando polímeros como condicionadores, ou seja, a mistura inicial continha o lodo na concentração de sólidos fixa juntamente com os polímeros no volume calculado para cada amostra (batelada de ensaios).

Solução polimérica e materiais

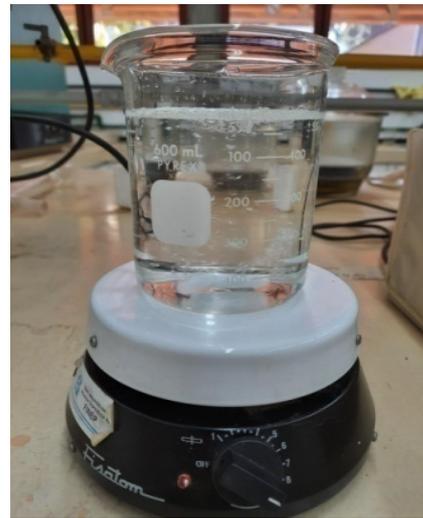
Primeiramente foram preparadas as soluções poliméricas utilizando os polímeros selecionados (A110 HMW, A130 HMW- aniônicos e C495 HMW e C496 HMW – catiônicos). Para cada polímero foi medida a massa, (utilizando balança analítica com precisão de 3 casas decimais- Figura 35a) de acordo com a concentração desejada. Foram definidos 3 teores (C de 0,05% - massa medida 0,5 g/L, C de 0,1% - massa medida 1,0 g/L, C de 0,2% - massa medida 2,0 g/L). Destaca-se que as concentrações de 0,1% e 0,2% foram utilizadas nos trabalhos já citados com SCRs. Foi selecionada, também, uma concentração menor (C de 0,05%) utilizada na prática, para testar o comportamento do polímero com o lodo estudado. Após a pesagem, a massa de polímero foi introduzida em 500mL de água destilada e homogeneizada com o auxílio do agitador magnético e barra magnética (“peixinho”) na velocidade máxima do equipamento (Figura 35b) por 40 minutos para completa mistura do polímero (a recomendação do fabricante é de 30 a 60 minutos de agitação do polímero para eficácia máxima). Encerrado esse tempo a solução polimérica preparada era acondicionada no balão volumétrico de 1 litro (Figura 35c).

Figura 35 - Preparação da solução polimérica. a) pesagem da massa em balança analítica Micronal B400; b) Agitação do polímero com água destilada no agitador magnético Fisatom e c) soluções poliméricas preparadas nos balões volumétrico de 1 litro

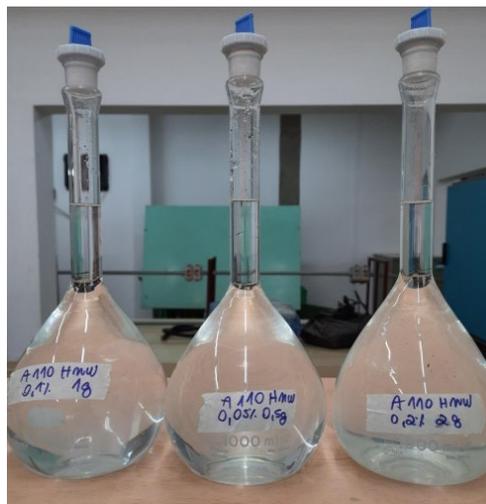
a)



b)



c)



Fonte: autora

Preparação do lodo, dosagens e ensaios

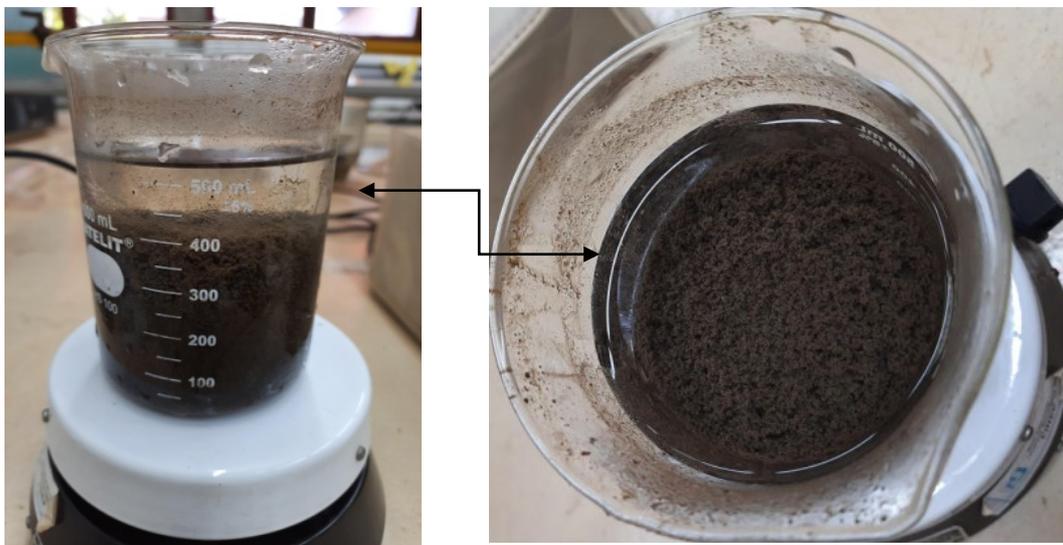
Com o lodo já preparado (volume de 20L) e concentração de sólidos fixa, foi utilizada uma amostra única de lodo (500 mL para cada ensaio acondicionado em um béquer) e adicionadas as dosagens pré-determinadas de 5, 10, 20 ml/L com o auxílio de uma seringa plástica graduada e realizada a homogeneização (com utilização do agitador magnético e barra magnética por 5 minutos - Figura 36a). Posteriormente o lodo condicionado quimicamente foi vertido sobre o cone de geotêxtil, preparados a partir de corpos de prova com 30 cm de diâmetro e dobrados em forma de cone presos por prendedores de tecido e fixos em um suporte metálico. Abaixo desta estrutura foi colocado um béquer de 500 mL para coleta do volume filtrado final. (Figura 36b) Após

10 minutos, conforme detalhado na literatura, o ensaio era encerrado e eram feitas as leituras do volume filtrado final com a ajuda de uma proveta de 1 litro e a medição direta da turbidez através do turbidímetro.

Nas Figuras 36c e 36d podem-se observar o lodo retido e o volume de água filtrada nos ensaios.

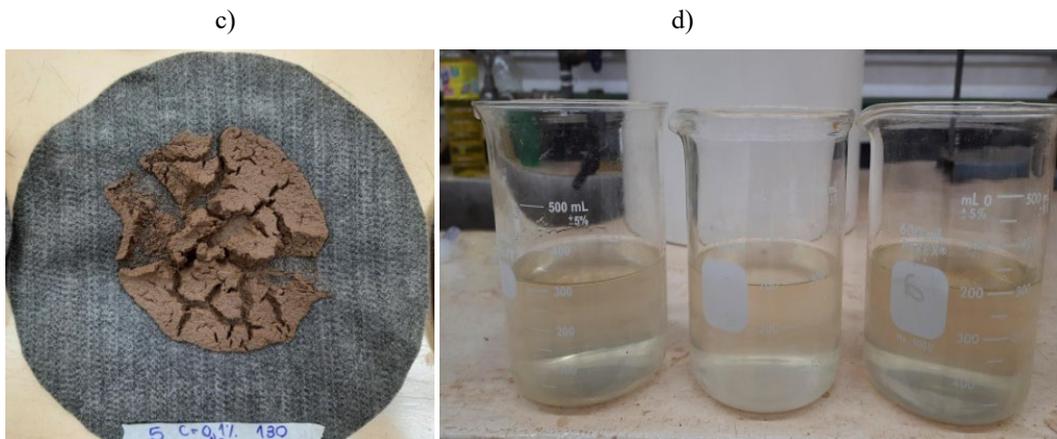
Figura 36 - Ensaio de cone a) aspecto do lodo com aplicação do polímero; b) ensaio de cone: início e fim do vertimento do lodo -após 10 minutos c) lodo retido e d) volume filtrado

a)



b)





Fonte: autora

Para a presente pesquisa, a escolha do polímero na concentração ótima, deu-se analisando o maior volume percolado em um intervalo de tempo de 10 minutos, como pré-requisito de seleção principal, com menor turbidez, como seleção secundária. Os polímeros selecionados foram reproduzidos nos ensaios de sistema LD com diferentes geotêxteis.

Resumidamente, conforme consta na Tabela 35, foram realizados ensaios com 4 polímeros (A110 HMW, A130 HMW, C495 HMW e C496 HMW), 3 teores diferentes (0,05%, 0,1% e 0,2%), 3 dosagens (5, 10 e 20 ml/L) e 3 geotêxteis (GTNT400, GTNT900 e GT80), totalizando 111 testes de cone. Ressalta-se que esses ensaios também foram realizados com o lodo bruto (mistura na concentração de 2% de sólidos). Esses ensaios foram reproduzidos uma vez, não sendo realizados em triplicata.

Tabela 35 - Sistematização dos ensaios - testes de cone				
Mistura	Polímeros	Concentrações (%)	Dosagens (ml/L)	Geotêxteis (g/m ²)
500 ml na concentração de 2% de sólidos	A110 HMW	0,05	5, 10 e 20	400, 900 e GT80
	A130HMW			
	C495 HMW	0,2		
	C496 HMW			
				Total:111 ensaios

Fonte: autora

A configuração do ensaio de cone realizada no sistema de LD (Figura 37), seguiu a mesma metodologia descrita anteriormente, mas, para este caso, foi utilizada a balança para aquisição de dados de vazão, ou seja, o sistema operacional

que compunha o LD. Essa configuração foi realizada com o GTNT600. Para este geotêxtil, foram testados 4 polímeros (A110 HMW, A130 HMW, C495 HMW e C496 HMW), 3 teores diferentes (0,05%, 0,1% e 0,2%), 3 dosagens (5, 10 e 20 ml/L), totalizando 37 ensaios. Ressalta-se que esses ensaios também foram realizados com o lodo bruto (mistura na concentração de 2% de sólidos), reproduzidos uma vez não sendo realizados em triplicata.

Figura 37 - Ensaio de cone realizado no sistema de LD



Fonte: autora

3.3.4.3 ENSAIO CP-CONE

Os resultados dos ensaios de cone, correspondentes aos polímeros que apresentaram maior volume filtrado e menor turbidez para os diferentes geotêxteis (GTNT400, 600, 900 e GT80) foram aplicados ao sistema de LD caracterizados como CP-cone, seguindo as mesmas alturas dos ensaios SP (H10, H30 e H50 cm) a fim de realizar a comparação dos ensaios de desaguamento no protótipo de LD-SP; CP-cone e CP-alternativo (explicado posteriormente), avaliando a qualidade do filtrado (sólidos totais, sólidos dissolvidos totais, sólidos em suspensão, cor, turbidez e pH) massa retida e teor de umidade do lodo, entre outras análises. Ou seja, foram realizadas as mesmas análises do ensaio SP.

Esses ensaios seguiram metodologia descrita para os ensaios SP (subtópico 3.3.3), com algumas modificações.

Com a mistura de lodo preparada na concentração de 2% foram adicionados os polímeros nas dosagens estipuladas, de acordo com o volume de cada ensaio. O volume das misturas produzidas era de 60 litros, correspondente a 3 bateladas, ou seja, 1 triplicata dos ensaios. A Tabela 36 mostra os geotêxteis ensaiados e o volume de cada polímero adicionado à mistura, ou seja, aplicado como condicionador. Ao adicionar o polímero em bombona com volume de 200 litros foi realizada uma agitação manual vigorosa por 5 minutos para que ele fosse completamente misturado com o lodo. Em seguida, eram colocados os volumes correspondentes a cada altura e o ensaio era iniciado.

Tabela 36 - Quantidade de polímeros adicionados a mistura para os geotêxteis ensaiados (CP - cone)

Geotêxteis ensaiados (g/m²)	Volume de polímero adicionado a mistura (L)
400	2,4
600	0,6
900	2,4
80	2,4

Fonte: autora

O critério de parada estabelecido para ensaios CP-cone foi de 72 horas (3 dias).

A Figura 38a ilustra um ensaio CP-cone utilizando geotêxtil de massa por unidade de área de 400 g/m², nas alturas de H10, H30 e H50 cm e um exemplo para H50 cm após a finalização do ensaio. Foi observada que toda a água foi drenada (Figura 38b) e o lodo retido sobre o geotêxtil (Figura 38c).

Figura 38 - Fotografia de ensaio com o GTNT400 CP-cone a) com H10, H30 e H50 cm b) água drenada para H50 cm e c) aspecto do lodo retido



b)



c)



Fonte: autora.

3.3.4.4 Descrição do ensaio alternativo

Com a finalidade de estudar outro método de seleção de polímeros para serem aplicados aos ensaios de leito de drenagem, foi utilizado um denominado “alternativo”. A ideia desta metodologia surgiu durante a realização dos ensaios de cone e seus respectivos resultados.

O ensaio aplicando o “método alternativo” foi realizado no protótipo de LD utilizando o sistema e a balança para aquisição de dados de vazão. Dessa forma,

foram utilizados três cilindros, correspondentes a três dosagens (5, 10 e 20 ml/L), de um polímero, simultaneamente. O método de preparação da solução polimérica e o tempo de ensaio foram idênticos ao ensaio de cone, assim, como as análises do volume filtrado e turbidez. No início do ensaio, o polímero mais o lodo (volume de 500 mL contido nos copos Griffin), eram introduzidos manualmente em cada cilindro, que continham as amostras de geotêxteis de diâmetro 15 cm em cada base, preenchidos com minibolas de vidro (tipo bolas de gude) no fundo (altura de 4 cm) que serviram como meio suporte para o geotêxtil.

Após isso, o ensaio era iniciado, abrindo-se o registro de globo, sendo o filtrado encaminhado para os recipientes sobre as balanças. Passados 10 minutos, o ensaio era encerrado, o sistema era lavado e preparado para aplicação de outro polímero. Esses procedimentos foram realizados até que todos os condicionadores químicos fossem testados.

Conforme Figura 39, pode-se observar o sistema montado, contendo os três cilindros e os recipientes colocados sobre as balanças para coleta do volume filtrado final

Figura 39 - Configuração do ensaio alternativo



Fonte: autora

Para este método, a escolha do polímero deu-se da mesma forma que para os ensaios de cone, ou seja, maior volume percolado com menor turbidez. Na Tabela 37

estão discriminados os geotêxteis ensaiados e o volume de cada polímero adicionado à mistura.

Tabela 37 - Quantidade de polímeros adicionados a mistura para os geotêxteis ensaiados (CP – alternativo)

Geotêxteis ensaiados (g/m²)	Volume de polímero adicionado a mistura (L)
400	1,2
600	2,4
900	2,4
80	0,6

Fonte: autora

Resumidamente para o método alternativo foram realizados ensaios com 4 polímeros (A110 HMW, A130 HMW, C495 HMW e C496 HMW), 3 teores diferentes (0,05%, 0,1% e 0,2%), 3 dosagens (5, 10 e 20 ml/L) e 4 geotêxteis (GTNT400, GTNT600, GTNT900 e GT80), totalizando 148 testes. (Tabela 38). Ressalta-se que esses ensaios também foram realizados com o lodo bruto (mistura na concentração de 2% de sólidos) e foram reproduzidos uma vez não sendo realizados em triplicata.

Tabela 38 - Sistematização dos ensaios –método alternativo

Mistura	Polímeros	Concentrações (%)	Dosagens (ml/L)	Geotêxteis (g/m²)
500 ml na concentração de 2% de sólidos	A110 HMW	0,05	5, 10 e 20	400, 600, 900 e GT80
	A130HMW	0,1		
	C495 HMW	0,2		
	C496 HMW			
				Total:148 ensaios

Fonte: autora

3.3.4.5 Ensaio CP-alternativo

Os resultados derivados dos ensaios alternativos foram aplicados ao sistema de LD e foram designados como CP-alternativo.

Esses ensaios foram realizados com as mesmas alturas de camada de lodo e geotêxteis ensaiados anteriormente e foram comparados com os ensaios SP e CP-cone.

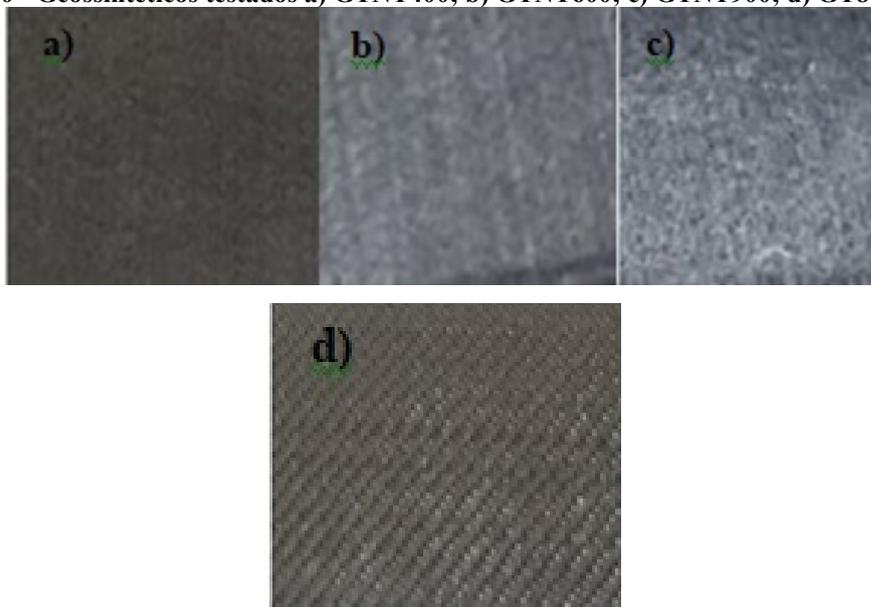
As qualidades dos filtrados foram avaliadas, assim como, as massas retidas e os teores de umidade dos lodos, entre outras análises.

Esses ensaios seguiram a mesma metodologia descrita para os ensaios CP-cone (subtópico 3.3.4.3) e o mesmo critério de parada foi estabelecido (72 horas).

3.4 Ensaios para caracterização dos geotêxteis

Foram utilizados quatro geotêxteis como camadas filtrantes aplicados aos protótipos de LD. Dentre os quatro, três eram não-tecidos, dois de massa por unidade de área 400 e 600 g/m² de polipropileno (PP) e um de 900 g/m² de poliéster (PET), agulhados, de fibras curtas, designados GTNT400, GTNT600 e GTNT900 e um geotêxtil tecido de PP designado respectivamente de GT80. (Figura 40 e Tabela 39). Os geossintéticos utilizados foram doados pela empresa OBER (geotêxteis não tecidos) e o tecido pela empresa HUESKER.

Figura 40 - Geossintéticos testados a) GTNT400; b) GTNT600; c) GTNT900; d) GT80



Fonte: autora

Tabela 39 - Especificações dos geossintéticos utilizados nesta pesquisa

Fabricante	Geotêxtil	Massa por unidade de área (g/m²)
OBER	GEOFORT 100% PP / L. 2,30/ GR400- CIN (100% POLIPROPILENO)	400
OBER	GEOFORT 100% PP / L. 2,30/ GR600- CIN (100% POLIPROPILENO)	600
OBER	GEOFORT 100% PES / L. 2,30/ GR900- CIN (100% POLIESTER)	900
HUESKER	BASETRAC WOVEN PP80	tecida

Fonte: OBER.

Os ensaios realizados para confirmação da caracterização dos geotêxteis selecionados, segundo normas correspondentes, estão apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - Ensaios de caracterização dos geotêxteis

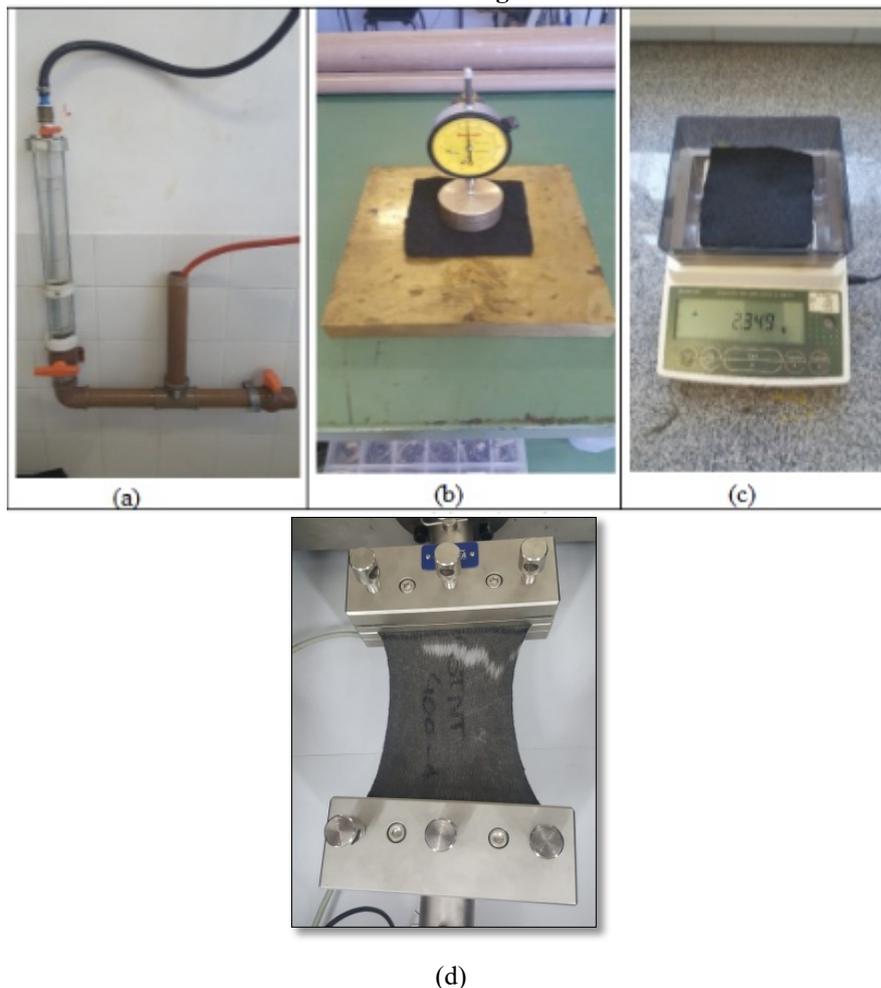
Ensaio	Norma	Unidade
Permeabilidade normal	ASTM D 4491 (1999)	cm/s
Massa/área	ASTM D 3776 (2017)	g/m ²
Espessura nominal	NBR 12569 (1992)	mm
Permissividade	ASTM D 4491 (1999)	s ⁻¹
Ensaio de tração faixa larga	NBR ISO 10319 (2013)	kN/m
Abertura de filtração	ASTM D 4751 (2016)	mm

Fonte: autora

As caracterizações foram realizadas no Laboratório de Geotecnia e Geossintéticos do campus São Carlos da UFSCar.

Para o ensaio de permissividade, utilizou-se o permeâmetro (Figura 41a); para o de espessura o equipamento mostrado na Figura 41b; para cálculo da massa por unidade de área, utilizou-se a balança analítica para pesar a amostra com uma área já conhecida (Figura 41c). Por fim, para o ensaio de tração, utilizou-se o equipamento ilustrado na Figura 41d. Para todos os ensaios, os geotêxteis foram mapeados e retiraram-se várias amostras em corte longitudinal para uma melhor amostragem estatística.

Figura 41 - Equipamentos utilizados para ensaios de caracterização dos geotêxteis (a) ensaio de permissividade (b) ensaio de espessura (c) ensaio de massa por unidade de área (d) ensaio de tração a faixa larga



Fonte: autora

Os resultados dos ensaios de caracterização desses geotêxteis estão no tópico Resultados- subtópico 4.1.

3.5 Parâmetros Monitorados

Todas as análises seguintes foram realizadas em triplicata.

3.5.1 MEDIÇÃO DE VAZÃO DOS ENSAIOS DE DESAGUAMENTO

Durante a realização dos ensaios (SP, CP-cone e CP-alternativo) foi medida a massa de água drenada de forma contínua, através de uma balança. A metodologia consistiu em conduzir o fluxo drenado até recipientes colocados sobre balanças. Nelas foram registrados os dados de variação de massa a cada minuto do experimento com o equipamento de aquisição de dados.

Assim, a vazão média no intervalo Δt analisado foi caracterizada pela variação da massa sobre a massa específica da amostra (ρ). Esses cálculos também podem ser realizados para determinação dos volumes acumulados e alturas de lodo (carga hidráulica) em função do tempo, até finalizar a drenagem.

De acordo com a Equação 8, podem ser determinadas as taxas de vazões do drenado e o percentual de volume de drenado de água livre em função do tempo.

$$\text{Taxa de } Q = \frac{\Delta m}{\Delta t \times \rho \times A} \quad (8)$$

Sendo:

Q ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) – Vazão em litros por minuto a cada m^2 de geotêxtil.

Δm (kg) – Variação da massa no intervalo de tempo Δt .

ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) – Massa específica do drenado (considerando a massa específica do lodo $1,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

Δt (min) – Intervalo de tempo.

A (m^2) – Área de aplicação do lodo no geotêxtil.

3.5.2 QUALIDADE DO LÍQUIDO DRENADO

A qualidade do líquido drenado para os ensaios SP, CP-cone e CP-alternativo foi analisada através de uma amostra única coletada ao final de cada drenagem. As análises realizadas foram: cor aparente, turbidez, pH, sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos em suspensão totais (SST) e teor de sólidos (em triplicata) segundo os métodos preconizados pela APHA/AWWA/WEF (2001).

Conforme já descrito no subtópico 3.3.3 (Ensaio sem polímero-SP), nos ensaios em triplicata GTNT400-SP H50 cm e triplicata dos ensaios GTNT900-SP H50 cm, além das análises nos líquidos drenados, foram realizadas coletas e análises dos sobrenadantes (líquidos que não passaram pelos geotêxteis), no tempo estabelecido de 72 horas.

As análises realizados foram similares a dos líquidos drenados, ou seja, cor aparente, turbidez, pH, sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos em suspensão totais (SST) e teor de sólidos, a fim de comparar com os líquidos drenados. Para os outros ensaios realizados (outros geotêxteis SP e para todos CP-cone e CP-alternativo) todo o líquido foi drenado no período estabelecido na pesquisa.

Segundo APHA/AWWA/WEF (2018), os sólidos totais (ST) são definidos como material restante em um recipiente após a evaporação de uma amostra e sua posterior secagem em estufa à temperatura definida. Sólidos totais incluem sólidos sem suspensão totais (SST), como a porção de sólidos totais retidos por um filtro com abertura definida, e sólidos dissolvidos totais (SDT), como a porção que passa pelo filtro. Na Tabela 41, tem-se um resumo das análises realizadas.

Tabela 41 - Resumo das análises realizadas

Ensaio	Tipo de amostra	Análises realizadas	Método
SP CP-cone CP-alternativo	Única e coletada ao final da drenagem	Cor Aparente Turbidez	APHA/AWWA/WEF (2001)
1-2-3 GTNT400 SP-H50 1-2-3 GTNT 900 SP-H50 (não foram completamente drenados)	Sobrenadante e coleta ao final	pH SDT SST Teor de sólidos (em triplicata)*	

OBS: Para os ensaios 1-2-3 GTNT400 SP-H50 e 1-2-3 GTNT 900 SP-H50 a quantidade de água coletada não foi suficiente para realização de ensaios em triplicata, assim, foi realizada apenas uma análise para cada ensaio.

Fonte: autora

3.5.3 Massa retida seca no geotêxtil (M_R seca) e teor de umidade do lodo retido

A massa retida seca (M_R seca) é a massa de lodo que ficou retida até a redução expressiva da vazão do sistema, ou seja, o fim da drenagem. Portanto, a massa retida seca foi expressa pelo lodo seco em estufa (em gramas) somada com os finos que ficaram no geotêxtil após secagem em estufa (em gramas), conforme Equação 9. Destaca-se que a temperatura de controle da estufa foi de 60 °C para que não fossem danificadas as fibras dos geotêxteis ensaiados.

$$M_R \text{ seca} = \text{lodo seco} + \text{finos} \quad (9)$$

Onde:

M_R seca é a massa de lodo retida no geotêxtil após secagem em estufa à 60 °C (g);

Lodo seco em estufa (g);

Finos - material que ficou sobre o geotêxtil, após secagem em estufa (g).

Também, foi realizada, a análise do teor de umidade do lodo que ficou retido sobre o geotêxtil, sendo explicada na Equação 10, como:

$$\text{teor de umidade}(\%) = \frac{P_0 - P_1}{P_0} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

P_0 é a massa final úmida de lodo, descontando o geotêxtil (g);

P_1 é a massa de lodo retida seca (g).

Ambas as análises não foram realizadas apenas para os ensaios em triplicata referentes ao GTNT400-SP H50 e GTNT900-SP H50, pois, como já mencionado no item 3.5.2 a drenagem não cessou no período estipulado da pesquisa (72 horas), inviabilizando as mesmas.

Nas Figuras 42 e 43, pode-se observar o aspecto do geotêxtil e o aspecto do lodo.

Figura 42 - Aspecto do geotêxtil a) aspecto do lodo úmido sob o geotêxtil; b) geotêxtil úmido após a raspagem do lodo e c) aspecto do geotêxtil seco, apenas com os sólidos finos restantes.



Fonte: autora.

Figura 43 - Aspecto do lodo a) lodo úmido que foi raspado do geotêxtil acondicionado no cadinho e b) aspecto do lodo seco



Fonte: autora.

3.6 Critérios de eficiência

3.6.1 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO TOTAIS (E_{SST})

O lodo preparado na concentração de 2% (mistura inicial) e o filtrado coletado produzido através de uma amostra única foi encaminhado ao laboratório e realizado os sólidos em suspensão totais (SST), a fim de medir a qualidade do filtrado final. Foi calculada a eficiência de remoção de SST (E_{SST}) pela Equação 11:

$$E_{SST} = \frac{SST_i - SST_f}{SST_i} \cdot 100 \quad (11)$$

Onde:

E_{SST} a eficiência de remoção de SST (%);

SST_f a concentração de SST final (obtido através de uma amostra única) (mg/L);

SST_i a concentração de SST inicial (mistura inicial na concentração de 2%) (mg/L).

3.6.2 EFICIÊNCIA DE FILTRAÇÃO (EF)

Este índice é muito utilizado para avaliar o desempenho de desaguamento em SCR e foi aplicado ao protótipo de LD.

Moo-Young e Tucker (2002) expressaram a EF como a relação entre os Sólidos Totais (ST) do lodo filtrado (efluente) e os sólidos totais (ST) da mistura de lodo.

$$EF = \frac{ST_{\text{inicial}} - ST_{\text{final}}}{ST_{\text{inicial}}} \times 100 (\%) \quad (12)$$

Onde:

ST_{inicial} é o ST inicial da mistura (mg/L)

ST_{final} é o ST final do filtrado obtido através de uma amostra única (mg/L).

Estas eficiências foram calculadas para todos os ensaios realizados (SP, CP-cone e CP-alternativo).

3.7 Análise dos resultados dos ensaios de desaguamento SP e CP

A análise dos resultados dos ensaios de desaguamento de lodo de ETA sem a utilização de polímeros (SP) e com a adição de polímeros (CP-cone e CP-alternativo) em Leito drenagem foi realizada através de análise individual e combinada dos respectivos ensaios, tomando como base os parâmetros de qualidade e quantidade.

Para os parâmetros de qualidade foram utilizadas amostras únicas (coletadas ao final da drenagem dos ensaios). Os resultados referentes aos parâmetros de qualidade (cor aparente, turbidez, pH, SDT e SST) foram abordados graficamente contemplando a média das triplicatas realizadas para cada carga hidráulica, geotêxtil ensaiado e os diferentes tipos de configurações dos ensaios, com o intuito de avaliar a qualidade final da água drenada.

Derivadas destas análises foram realizados gráficos contendo o ST do drenado e sobrenadante final para os ensaios nos quais nem toda água havia sido drenada (ensaios com GTNT400 e 900-SP com H50 cm) juntamente com as eficiências de filtração (%) calculadas para todos os ensaios realizados. Também, foram calculadas as eficiências de remoção de SST (%) contidas nos gráficos referentes ao parâmetro de SST. Foram realizadas análises gráficas para o teor de umidade do lodo, em termos de massa úmida.

Os dados referentes à média da massa retida seca foram utilizados como parâmetro de entrada para a análise estatística realizada neste trabalho, explicada posteriormente (tópico 3.8).

Em relação às análises quantitativas (porcentagem de líquido drenado e taxa de vazão) foi considerado o tempo pré-estabelecido de 72 horas (4320 minutos). Para essas análises, também, foram consideradas as médias das triplicatas de cada ensaio realizado com diferentes geotêxteis, cargas hidráulicas e utilização ou não de polímeros.

Na pesquisa de Santos (2012), o autor destacou, que quando registrava-se a vazão de 1,67 mL/min, atribuída por Barroso (2007) como vazão final de drenagem, ainda existiam volumes representativos de lodo no LD nos seus ensaios, com isso o autor considerou como final da drenagem o término do fluxo de água livre.

Ainda assim, Barroso (2007) considerou a vazão de 1,67 ml/min como a vazão final de drenagem para um LD com contribuição lateral do geotêxtil, o que não foi observado nos trabalhos de Santos (2012), Silveira (2012) e Minatel (2021) que estudaram apenas o fluxo normal ao plano do geotêxtil.

Nos experimentos de Santos (2012) e Silveira (2012), os LDs apresentavam diâmetros distintos, apresentando seus resultados de vazão em mL/min, tornando difícil a comparação entre seus resultados.

Para esta pesquisa, conforme Santos (2012), Silveira (2012) e Minatel (2021) foi observado apenas o fluxo normal ao plano do geotêxtil. Semelhante ao que propôs Minatel (2021) foi utilizada a taxa de drenagem por metro quadrado de geotêxtil, ou seja, L/min/m², que representa a vazão drenada no tempo de um minuto dividida pela área efetiva de drenagem do lodo no LD, onde está o geotêxtil.

Os resultados observados foram sistematizados a fim de possibilitar a avaliação global da influência das diferentes condições a que foram submetidos os leitos durante as drenagens. Foram avaliadas a influência de uma concentração fixa (2%), das diferentes alturas de camada de lodo aplicados (H10, H30 e H50 cm) e das diferentes TAS no desaguamento em LD para os quatro tipos de geotêxteis utilizados.

A sistematização proposta para ensaios CP (CP-cone e CP-alternativo) e SP considerou o agrupamento das observações nas seguintes variáveis respostas:

- Taxa de vazão (L/m²/min);
- Porcentagem drenada em relação ao volume de lodo aplicado;
- Tempo para o término do fluxo de água livre;
- Análise do drenado e sobrenadante observando o parâmetro de Turbidez;
- Análise do drenado e sobrenadante observando o parâmetro Cor aparente;
- Análise de drenado e sobrenadante observando o parâmetro de SDT e SST;
- Análise de drenado e sobrenadante observando o parâmetro de ST;
- Análise de drenado e sobrenadante observando o parâmetro de pH;
- Análise da EF e Esst.

3.8 Análise estatística dos dados

Os dados obtidos referentes a massa retida seca, foram submetidos a análise de inferência estatística a fim de avaliar a significância de alguns parâmetros a partir de hipóteses pré-estabelecidas.

Uma hipótese estatística, ou simplesmente hipótese, é uma alegação ou afirmação sobre o valor de um único parâmetro, sobre os valores de vários parâmetros. Nos problemas de teste de hipótese, existem duas suposições contraditórias em consideração, tendo como objetivo decidir, com base na informação amostral, quais das duas hipóteses está correta.

A hipótese nula, representada por H_0 , é a alegação inicialmente assumida como verdadeira; já a hipótese alternativa representada por H_a é a informação contraditória de H_0 .

A aceitação ou não de uma hipótese é feita por uma estatística de teste, que representa uma função de dados amostrais utilizados como uma base para decidir se H_0 deveria ser rejeitada. Para isso emprega-se o *valor-p* que representa a probabilidade calculada assumindo que a hipótese nula é verdadeira. Uma conclusão é atingida em uma análise de teste de hipótese selecionando um número α , chamado nível de significância do teste. Então, H_0 será rejeitada em favor de H_a se $\text{valor} - p \leq \alpha$, ao passo que H_0 não será rejeitada se o $\text{valor} - p > \alpha$.

O nível de significância (α) considerado nas análises foi de 5%, indicando que o nível de confiança foi de 95%, exceto quando, pelo número reduzido de amostras, o nível de confiança teve que ser reduzido para 85%, aumentando o nível de significância para 15%.

As inferências estatísticas realizadas foram baseadas na comparação de duas amostras, sejam com dois tipos de geotêxteis, ou duas diferentes cargas hidráulicas, ou empregando ou não o uso de polímeros.

A Tabela 42 apresenta os parâmetros analisados e as hipóteses consideradas.

Tabela 42 - Parâmetros considerados nas inferências estatísticas e as hipóteses consideradas

Parâmetro	Hipóteses	Significado
Geotêxtil	$H_0: \mu_A = \mu_B$	Não há diferença significativa na média da massa retida seca entre os geotêxteis usados para uma mesma carga hidráulica
	$H_a: \mu_A \neq \mu_B$	Há diferença significativa na média da massa retida seca entre os geotêxteis usados para uma mesma carga hidráulica

Carga Hidráulica	$H_0: \mu_A = \mu_B$	Não há diferença significativa na média da massa retida seca quando submetido a diferentes cargas hidráulicas para um mesmo geotêxtil.
	$H_a: \mu_A \neq \mu_B$	Há diferença significativa na média da massa retida seca quando submetido a diferentes cargas hidráulicas para um mesmo geotêxtil.
Sistema de escolha do polímero	$H_0: \mu_A = \mu_B$	Não há diferença significativa na massa retida seca quando submetido ao ensaio de cone e ao ensaio alternativo quando submetido a mesma carga hidráulica para um mesmo geotêxtil.
	$H_a: \mu_A \neq \mu_B$	Há diferença significativa na massa retida seca quando submetido ao ensaio de cone e ao ensaio alternativo quando submetido a mesma carga hidráulica para um mesmo geotêxtil.
Polímero	$H_0: \mu_A = \mu_B$	Não há diferença significativa na média da massa retida seca quando usado polímero e submetido a mesmas cargas hidráulicas para um mesmo geotêxtil.
	$H_a: \mu_A \neq \mu_B$	Há diferença significativa na média da massa retida seca quando usado polímero e submetido a mesmas cargas hidráulicas para um mesmo geotêxtil.

Fonte: autora

Quando se tem um conjunto amostral pequeno ($n < 33$) não é possível garantir a normalidade dos dados. Nesse caso, são empregados os testes de livre distribuição ou não-paramétricos, a fim de determinar os níveis de significância.

Para esse caso, empregou-se o teste não paramétrico de *Wilcoxon* considerando os dados emparelhados, conforme descrito por Triola (2017).

O procedimento de teste de *Wilcoxon* é livre de distribuição porque tem o nível desejado de significância para uma classe muito grande de distribuições subjacentes. O teste da soma dos postos de *Wilcoxon* supõe: sejam X_1, \dots, X_m e Y_1, \dots, Y_n duas amostras aleatórias independentes de distribuições contínuas com médias μ_1 e μ_2 , respectivamente. As distribuições X e Y têm a mesma forma e dispersão, estando nos valores de μ_1 e μ_2 a única diferença possível entre as duas (Devore, 2018).

Dessa maneira, tem-se:

- Hipótese nula: $H_0: \mu_1 - \mu_2 = \Delta_0$
- Valor da estatística de teste: $T = \sum_{i=1}^m r_i$, quando $r_i =$ posto de $(x_i - \Delta_0)$ na amostra combinada dos $m + n \cdot (x - \Delta_0)$ e y .

- Hipótese alternativa Determinação do *p*-valor

$$H_a: \mu_1 - \mu_2 > \Delta_0$$

$$P_0(W \geq T)$$

$$H_a: \mu_1 - \mu_2 < \Delta_0$$
$$T)$$
$$H_a: \mu_1 - \mu_2 \neq \Delta_0$$

$$P_0(W \leq T) = P_0(W \geq m(m+n+1) - T)$$
$$2P_0(W \geq \max\{T, m(m+n+1) - T\})$$

4. Apresentação e discussão dos resultados

Este item apresenta os resultados e as discussões organizados nos seguintes subtópicos:

4.1 Caracterização dos geossintéticos (não- tecidos e tecido) utilizados como filtro no sistema de desaguamento de LD;

4.2 Caracterização do lodo bruto utilizado na preparação das misturas;

4.3 Resultados relativos aos métodos de seleção dos polímeros (cone e alternativo);

4.4 Resultados referentes às análises quantitativas (taxa de vazão e percentagem de água livre drenada) e às análises qualitativas dos drenados e dos sobrenadantes dos ensaios designados como SP – sem polímero, CP-cone – derivado dos resultados do ensaio de cone e CP - alternativo - derivados dos resultados do ensaio alternativo;

4.5 Análise estatística referente aos ensaios de desaguamento.

4.1 Caracterizações dos geossintéticos

Para os ensaios para determinação da massa por unidade de área foram utilizados 10 corpos de prova (CP) para cada geotêxtil não-tecido testado. Na Tabela 43, têm-se as massas por unidade de área obtidas, bem como os desvios-padrões (σ) e coeficientes de variação (CV). Os resultados mostraram que o desvio padrão e o coeficiente de variação calculados foram menores para o GTNT900, indicando uma maior homogeneidade dos resultados desta amostra, seguido do GTNT 600 e por último do GTNT400.

Tabela 43 - Massa por unidade de área média dos geotêxteis não-tecidos

Quantidade de amostras (CP)	Massa por unidade de área fabricante (g/m^2)	Sigla GT	Área da amostra (m^2)	Massa por unidade de área média medida (g/m^2)	σ (g/m^2)	CV (%)
10	400	GTNT400	0,01	337	27,2	8,1
10	600	GTNT600	0,01	562	32,3	5,7
10	900	GTNT900	0,01	802	23,8	3

Fonte: autora.

A Tabela 44 mostra os valores de massa por unidade de área média e espessuras obtidas, juntamente com o desvio padrão e coeficientes de variação. Esses resultados demonstraram homogeneidade entre os resultados das amostras.

Tabela 44 - Espessura nominal dos geotêxteis não-tecidos

Quantidade de amostras (CP)	Massa por área média medida (g/m ²)	Sigla GT	Espessura média medida (mm)	σ (mm)	CV (%)
10	337	GTNT400	2,76	0,2	6,5
10	562	GTNT600	3,43	0,2	5,9
10	802	GTNT900	5,15	0,1	2,51

Fonte: autora

Os resultados dos ensaios de permeabilidade (K) e permissividade (ψ) foram apresentados na Tabela 45, bem como os respectivos desvios-padrões e coeficientes de variação. Para esses ensaios foram utilizados 5 corpos de prova (CP). Na Tabela 45, também, constam, os valores referentes à abertura de filtração fornecidos pelo fabricante, de acordo com a norma ASTM D 4751 (2016).

Tabela 45 - Permissividade e permeabilidade dos geotêxteis não-tecidos

Quantidade de amostras (CP)	Massa por unidade de área média medida (g/m ²)	ψ média medida (s ⁻¹)	K média medida (cm/s)	σ permissividade (s ⁻¹)	CV (%)	σ permeabilidade (cm/s)	CV (%)	Abertura de filtração (mm)
5	337	1,04	0,29	0,06	5,85	0,02	8,18	< 0,1
5	562	0,57	0,20	0,04	7,38	0,02	10,66	< 0,1
5	802	0,43	0,1	0,07	1,27	0,04	16,63	<0,074

Fonte: autora

Em relação ao geotêxtil tecido utilizado o parâmetro mais importante é a abertura de filtração e a resistência (devido ao tamanho) constantes na Tabela 46. Esses valores foram fornecidos pelo fabricante.

Tabela 46 - Valores de abertura de filtração e resistência à tração dos GT80

Geotêxteis tecidos	Abertura de filtração (mm)	Resistência à tração longitudinal (kN/m)	Resistência à tração transversal (kN/m)
GT80	0,20	80	80

Fonte: autora

Na Tabela 47 estão os resultados dos ensaios de espessura, permeabilidade e permissividade, desvio padrão e coeficiente de variação, realizados para este geotêxtil

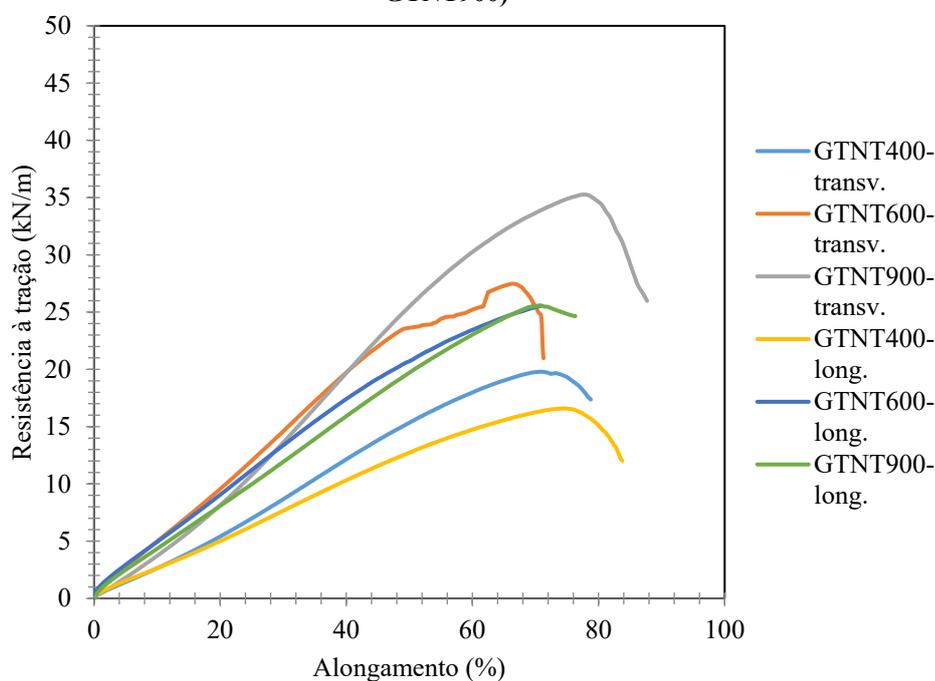
Tabela 47 - Resultados dos ensaios para GT80

Geotêxteis tecidos	Espessura (mm)/ σ (mm)/ CV(%)	Permeabilidade (cm/s)/ σ (mm)/ CV(%)	Permissividade (s^{-1}) / σ (mm)/ CV(%)
GT80	1,20/0,02/1,47	0,02/0,0025/14,3	0,15/0,02/14,1

Fonte: autora

Os resultados dos ensaios de resistência à tração para os geotêxteis não tecidos são mostrados na Figura 44. Na Tabela 48 têm-se os valores de resistência à tração encontrados, bem como o desvio padrão e coeficiente de variação dos dados.

Figura 44 - Resistência à tração-sentido transversal e longitudinal (GTNT400, GTNT600 e GTNT900)



Fonte:autora

Tabela 48 - Resistência à tração, desvio padrão e coeficiente de variação

GTNT	Resistência à tração-sentido longitudinal/ σ (mm)/ CV(%)	Resistência à tração-sentido transversal σ (mm)/ CV(%)
337	17/1,06/0,96	20/1,04/0,98
562	25/1,10/0,98	25/1,06/0,99
802	25/1,02/0,95	35/1,04/1,05

Fonte: autora

Em relação ao GT80, o ensaio de tração faixa larga não foi realizado, pois a garra que compõe o ensaio apresentou problemas, impossibilitando de realizá-lo em tempo hábil para esta pesquisa.

4.2 Caracterização do lodo bruto

Na Tabela 49 encontram-se os resultados de caracterização do lodo bruto em relação à série de metais, pH e teor de sólidos.

Destaca-se que existem na literatura grandes variações nas concentrações dos metais em lodos de estação de tratamento de água, pois são parâmetros que estão diretamente relacionados com a qualidade da água bruta, com os produtos químicos utilizados durante o processo de potabilização da água, e até com a época do ano em que se coletam as amostras.

Tabela 49 - Resultado do ensaio de Metais, pH e teor de sólidos

Análise	Resultado
Cobre	3,953 mg/Kg
Cromo	5,523 mg/Kg
Ferro	5.776, 736 mg/Kg
Manganês	328,48 mg/kg
Níquel	0,863 mg/Kg
Chumbo	0,519 mg/Kg
Alumínio	7.539, 332 mg/Kg
Zinco	8,673 mg/Kg
pH	6,88
Teor de sólidos	4,6%

Fonte: autora e Minatel (2021).

4.3 Resultados dos ensaios de cone e alternativo

Em relação aos métodos de seleção de polímeros para serem aplicados ao sistema de desaguamento com LD, foram avaliados dois métodos: o do cone (já conhecido na literatura) e outro método nomeado nesta pesquisa, como “alternativo”, já explicados anteriormente.

A Tabela 50 mostra os resultados dos polímeros escolhidos na dosagem ótima, (maior volume drenado e menor turbidez no tempo de 10 minutos) que foram aplicados

nos ensaios CP-cone. Nas Figuras 45 a 48 tem – se os volumes filtrados para cada geotêxtil ensaiado, onde pode-se comparar visualmente os resultados dos polímeros selecionados, destacando o melhor polímero (concentração e dosagem).

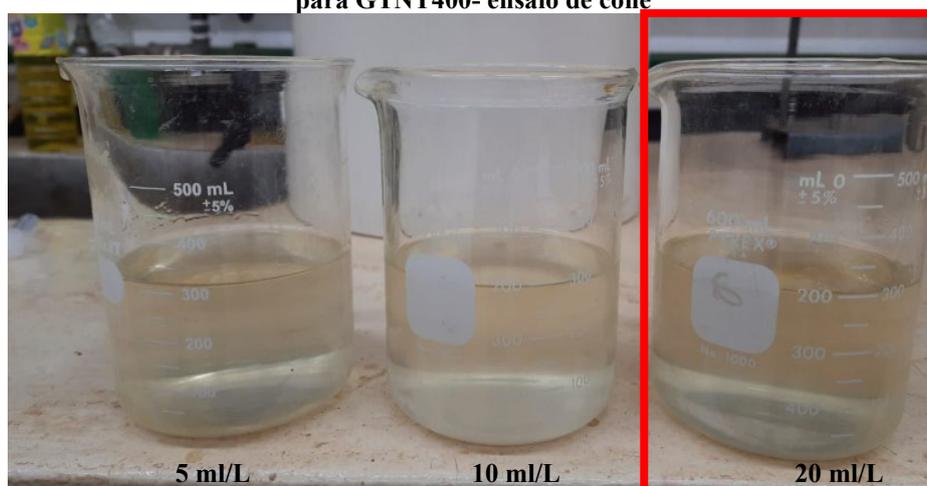
Tabela 50 - Resultados dos melhores polímeros derivados dos ensaios de cone

Geotêxteis ensaiados (g/m ²)	Melhor polímero (C) % e (D)* ml/L	Volume (mL)	Turbidez (NTU)
400	C495	320	9,67
	0,05 20		
600	A130	415	15,30
	0,05 5		
900	A110	259	15,20
	0,05 20		
80	C496	455	26,00
	0,1 10		

*C=concentração e D= dosagem

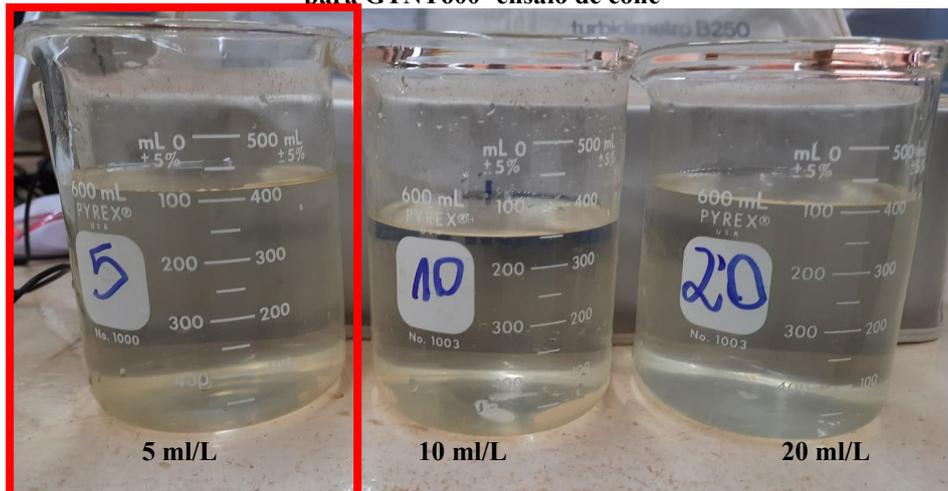
Fonte: autora

Figura 45 - Comparação do polímero C495 C=0,05%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 20 ml/L para GTNT400- ensaio de cone



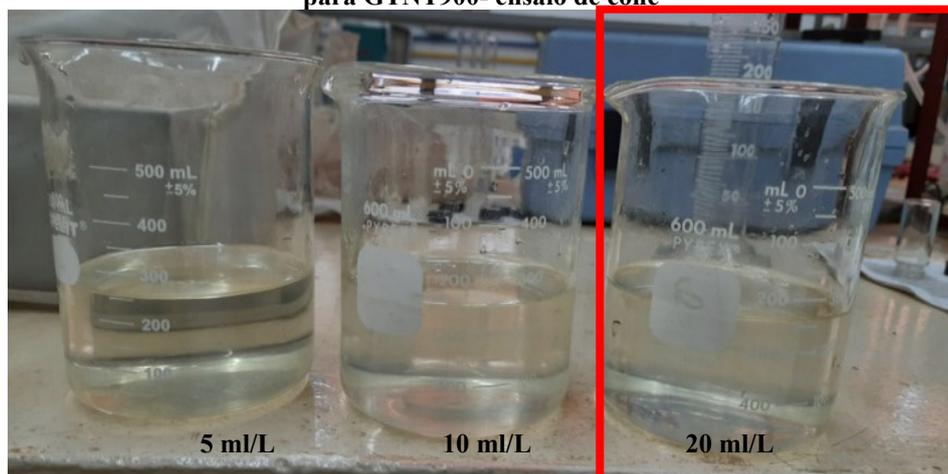
Fonte: autora

Figura 46 - Comparação do polímero A130 C=0,05%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 5 ml/L para GTNT600- ensaio de cone



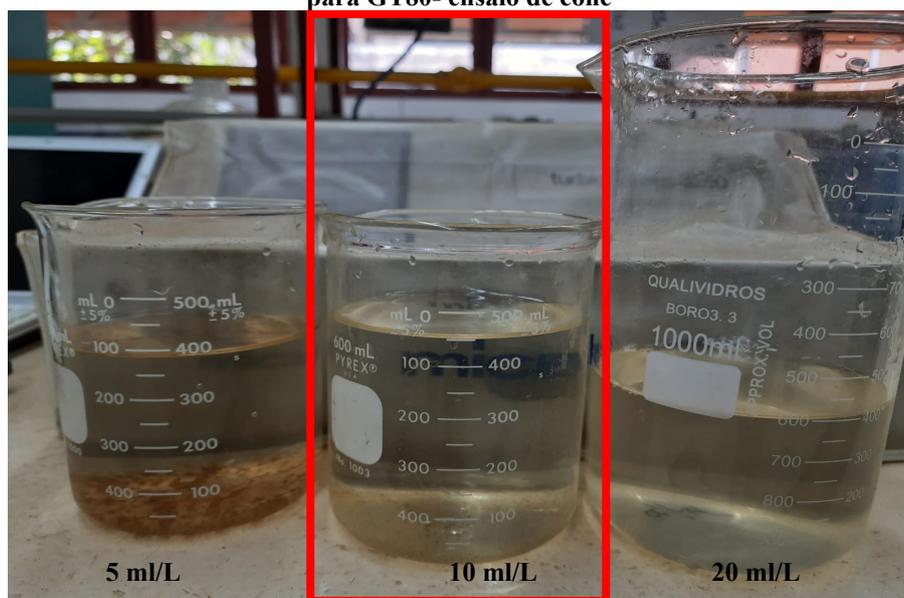
Fonte: autora

Figura 47 - Comparação do polímero A110 C=0,05%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 20ml/L para GTNT900- ensaio de cone



Fonte: autora.

Figura 48 - Comparação do polímero C496 C=01%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 10 ml/L para GT80- ensaio de cone



Fonte: autora

Para os ensaios alternativos, conforme Tabela 51 foram apresentados os geotêxteis ensaiados, com os respectivos resultados dos polímeros escolhidos na concentração ótima, (maior volume drenado e menor turbidez) que foram aplicados nos ensaios CP-alternativo. As Figuras 49 a 52 mostram os volumes filtrados para cada geotêxtil ensaiado, onde pode-se comparar visualmente os resultados dos polímeros selecionados, destacando o melhor polímero (concentração e dosagem) para os ensaios alternativos.

Tabela 51 - Resultados dos melhores polímeros derivados dos ensaios alternativos

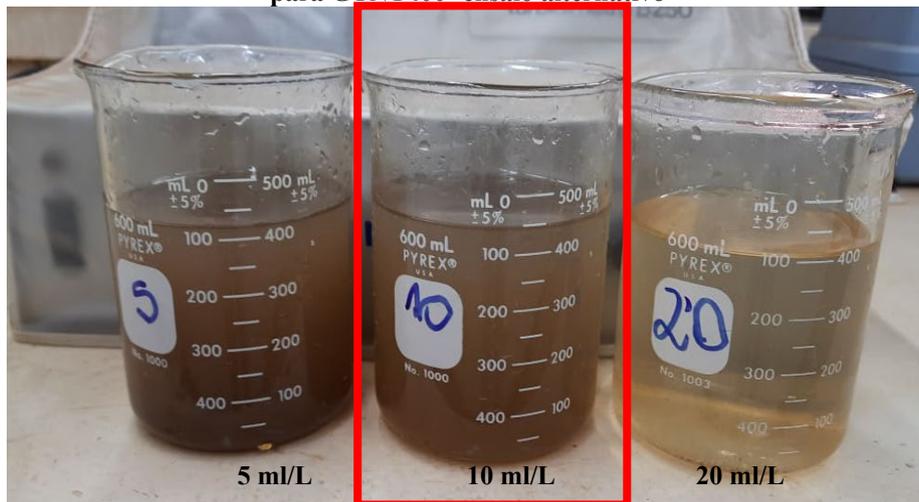
Geotêxteis ensaiados (g/m²)	Melhor polímero (C) % e (D)* ml/L	Volume (ml)	Turbidez (NTU)
400	C495	430	277
	0,05 10		
600	A110	415	25,00
	0,1 20		
900	A110	380	19,50
	0,2 20		

	A110		
80	0,1	415	200,00
	5		

*C=concentração e D= dosagem

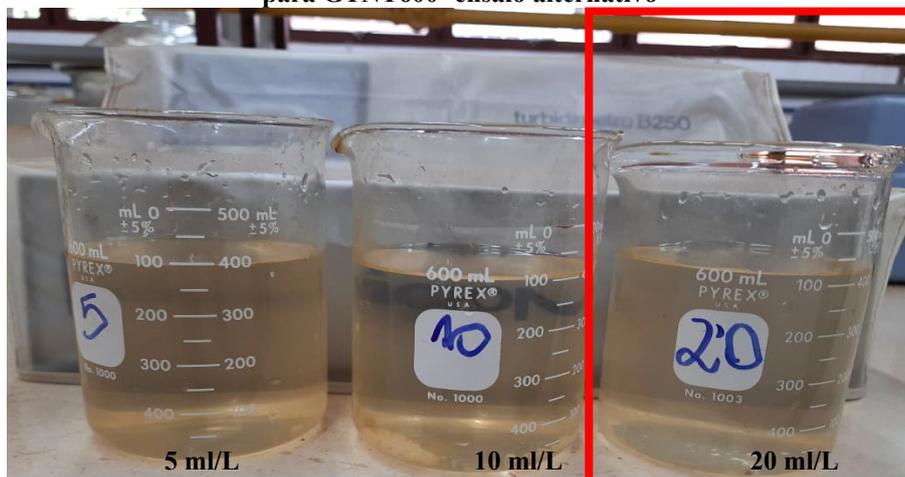
Fonte: autora

Figura 49 - Comparação do polímero C495 C=0,05%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 10 ml/L para GTNT400- ensaio alternativo



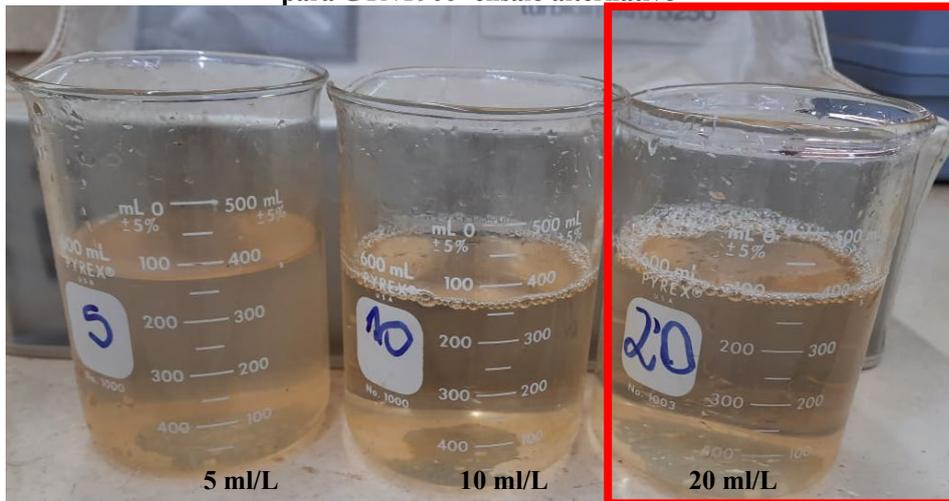
Fonte: autora

Figura 50 - Comparação do polímero A110 C=0,1%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 20 ml/L para GTNT600- ensaio alternativo



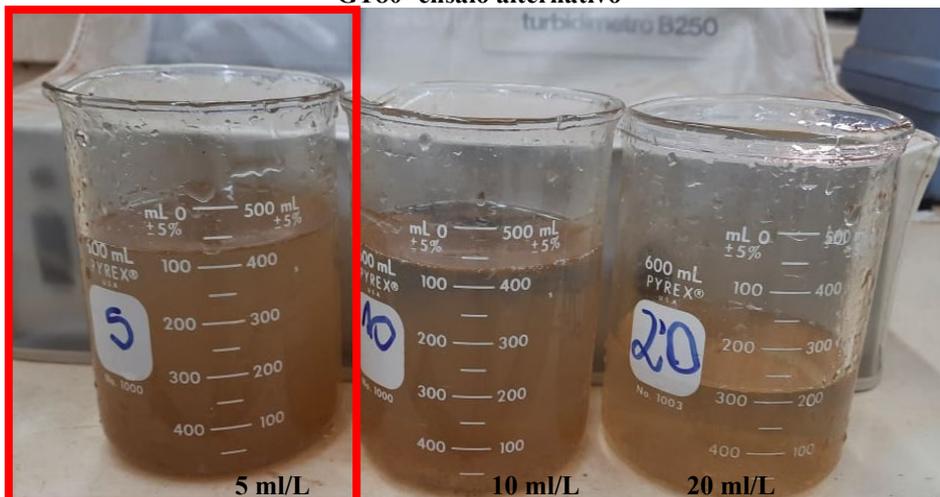
Fonte: autora

Figura 51 - Comparação do polímero A110 C=0,2%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 20 ml/L para GTNT900- ensaio alternativo



Fonte: autora

Figura 52 - Comparação do polímero A110 C=0,1%, D=5,10, 20 ml/L, melhor dosagem 5 ml/L para GT80- ensaio alternativo



Fonte: autora

Conforme o ensaio de cone foi realizado, entendeu-se que ao longo de todo processo experimental as taxas de aplicação de sólidos (TAS) entre os métodos estudados (ensaio de cone e alternativo) foram distintas, pois, nesses ensaios, as amostras de geotêxteis apresentavam diâmetros diferentes e, em decorrência disso, transmissividades diferentes. Ou seja, para o “ensaio alternativo” o diâmetro do geotêxtil foi de 15 cm, já, para o ensaio de cone, o diâmetro era de 30 cm, (diâmetro correspondente ao dobro do utilizado para o ensaio alternativo).

Sendo assim, as áreas dos ensaios foram distintas. Para o ensaio de cone, a área foi variável ao longo do teste, iniciando o ensaio com uma área maior, que diminuía ao longo do tempo, conforme o desaguamento do lodo ocorria, ou seja, a transmissividade é

variável. Já, para o ensaio alternativo (no sistema) a área foi menor, plana e fixa durante a realização dos ensaios ($t=10$ minutos), ou seja, a transmissividade é constante. Sendo considerado, somente o escoamento na direção normal no leito de drenagem.

Destaca-se que para o GTNT400, o polímero selecionado e a concentração (C495, $C=0,05\%$) foram as mesmas para os dois métodos analisados. Porém, foi obtido com o método alternativo, maior volume drenado com menor turbidez, para a $D=10$ ml/L; em contrapartida, aplicando o método do cone, a dosagem selecionada para atender o critério estabelecido (maior volume drenado e menor turbidez) foi o dobro. Caso estes resultados fossem replicados em campo, seria gasto menos com polímeros utilizando o método alternativo do que o método do cone. Já, para o GTNT900 o polímero selecionado entre os dois métodos foi o mesmo e as dosagens também (A110, $D=20$ ml/L), porém, com concentrações diferentes. Para o ensaio de cone, a concentração foi menor ($C=0,05\%$) do que para o ensaio alternativo ($C=0,2\%$), neste caso, se fosse utilizado o método alternativo o gasto com polímero na estação aplicado ao desaguamento seria maior. Para o GTNT600, apesar dos polímeros selecionados serem aniônicos para ambos os métodos de seleção, foram escolhidos polímeros, concentrações e dosagens diferentes. Já, para o GT80, o polímero selecionado no ensaio de cone foi catiônico (C496) diferente do que foi selecionado com o método alternativo que foi aniônico (A110), apesar de concentrações iguais ($C=0,1\%$), as dosagens foram distintas.

Comparando os volumes e valores de turbidez produzidos nos ensaios com polímeros selecionados no teste de cone (Tabela 50) com os do teste “alternativo” (Tabela 51), os volumes filtrados e os valores da turbidez foram, em sua maioria, menores nos ensaios de cone, ou seja, o filtrado teve melhor qualidade, neste caso. Já, para os ensaios alternativos foram obtidos maiores volumes filtrados (requisito principal de seleção) e maiores valores de turbidez, não obtendo a melhor qualidade dos drenados, mas, mantendo valores de turbidez satisfatórios. (Tabela 51).

Salienta-se que a configuração de ensaio do método alternativo é o que ocorre normalmente nos LD, pois, nesses sistemas, o fundo é plano e a transmissividade é constante.

Ainda assim, a revisão bibliográfica atual (SCALIONI *et al.*, 2019; URASHIMA *et al.*, 2020; URASHIMA, 2020 e ARDILA *et al.*, 2020) mostram que apesar do teste de cone ser aplicado com resultados promissores para a escolha de polímeros, ele é usualmente utilizado para SCR.

Portanto, para aplicação em sistemas de LD em escala de bancada com a utilização de polímeros, e também para reproduzir parcialmente o que ocorre no campo e conforme o critério de seleção adotado nesta pesquisa (maior volume filtrado, como requisito principal e menor turbidez, como requisito secundário) com a finalidade de melhorar a eficiência e qualidade de desaguamento, uma proposição metodológica derivada do método alternativo pode ser adotada para seleção dos polímeros. Discussões mais amplas encontram-se nos itens 4.4 e 4.5 referente aos resultados dos ensaios de LD e da análise estatística realizada.

Os resultados completos dos ensaios com todos os polímeros e geotêxteis analisados pelos métodos do cone e alternativo encontram-se no Anexo deste trabalho.

4.4 Ensaios SP, CP-cone e CP- alternativo

Um resumo dos ensaios de desaguamento realizados no sistema de LD pode ser observado na Tabela 52. Para esta pesquisa foi considerado um teor de sólidos fixo (2%), com 3 tipos de ensaios (SP-sem polímero, CP-cone, com polímeros, utilizando os resultados dos ensaios de cone e CP-alternativo, com polímeros, utilizando os resultados do método alternativo), 4 geotêxteis, sendo 3 destes não tecidos, (GTNT 400, 600 e 900) e 1 geotêxtil tecido (GT80), 3 alturas de camadas de lodo (H10, H30 e H50 cm) e conseqüentemente 3 TAS diferentes para drenagem. Todos esses ensaios foram realizados em triplicata para comprovar a reprodutibilidade do método utilizado. Assim, ao todo foram realizados 108 ensaios.

A duração dos ensaios limitou-se a 72 horas (3 dias), e nesse período pode-se observar a completa extinção da lâmina líquida de água sobre o lodo sedimentado no geotêxtil para os experimentos com carga hidráulica H10 e H30 cm para o GTNT400 e GTNT900 e para todas as cargas hidráulicas (H10, H30 e H50) utilizando o GTNT600 e GT80, independentemente da configuração do ensaio (SP, CP-cone e CP- alternativo). Exceto as cargas hidráulicas (H50 cm) com o GTNT400 e GTNT900 dos ensaios sem polímero (SP) ainda apresentavam fluxo de água livre no momento da interrupção das observações. Para esses ensaios foram coletados o sobrenadante e realizadas as mesmas análises de qualidade dos drenados.

Semelhante ao que observou Silveira (2012) em ensaios sem a utilização de polímeros, a extinção da lâmina líquida aconteceu em 2 dias de observação para ensaios com uma TAS máxima de 7,5 kg/m². Na pesquisa de Minatel (2021) foram obtidos resultados diferentes, pois TAS foram iguais ou inferiores a 7,5 kg/ m² ainda apresentavam fluxo de água livre após 48 horas de observação.

Tabela 52 - Sistematização dos ensaios realizados

ST (%)	Geotêxtil (g/m ²)	Carga Hidráulica (H) cm	Nomenclatura do tipo de ensaio realizado			TAS (kg/m ²)			Reprodutibilidade		
			SP	CP-cone	CP-alternativo	H=10 cm	H=30 cm	H=50 cm			
2	GTNT400 GTNT600 GTNT900 GT80	10	1H10	1H10	1H10	2	2	2	triplicata	triplicata	triplicata
			1H30	1H30	1H30	6	6	6			
		30	2H10	2H10	2H10	2	2	2			
			2H30	2H30	2H30	6	6	6			
		50	2H50	2H50	2H50	10	10	10			
			3H10	3H10	3H10	2	2	2			
		3H30	3H30	3H30	6	6	6				
		3H50	3H50	3H50	10	10	10				
Total: 108 drenagens											

Fonte: autora.

4.4.1 ANÁLISE DA RELAÇÃO TAXA DE DRENAGEM X TEMPO DECORRIDO

4.4.1.1 ENSAIOS SP

As Figuras 53 a 56 mostram os gráficos de taxa de drenagem por tempo decorrido dos ensaios sem polímero (SP) realizados em triplicata nos respectivos geotêxteis (GTNT 400, 600, 900 e GT80). Todos os gráficos foram ampliados a partir do início dos ensaios (tempo= 0 min) até 120 minutos (2 horas) para observação da variação da taxa de drenagem inicial.

Conforme observado nos gráficos, tem-se taxas de drenagem iniciais altas para todos os geotêxteis ensaiados, que está relacionada com o início do desaguamento, no qual a água foi drenada, ou seja, “escoou” pelo geotêxtil mais rapidamente, pois os poros dos geotêxteis encontravam-se livres. À medida que as partículas de lodo foram sedimentando, a vazão caiu drasticamente e isso ocorreu logo no início dos ensaios até a estabilização da taxa de vazão, independentemente da carga hidráulica aplicada e do geotêxtil ensaiado. Esse fato pode ter ocorrido por conta da formação do pré- filtro. O pré- filtro formado acima do geotêxtil pelo rearranjo das partículas do próprio lodo, tornou-se o responsável pela filtração e, a partir de sua formação, a taxa de vazão tornou-se constante até o fim do desaguamento do lodo, conforme ilustram as Figuras 53 a 56. Os ensaios de carga hidráulica H50 cm utilizando o GTNT400 e 900 (Figuras 53 e 55) não finalizaram no período estabelecido para este estudo, ou seja, 72 horas. Para esses geotêxteis ainda havia material a ser drenado, o que não ocorreu com o GTNT600 e GT80 (Figuras 54 e 56), que independentemente da carga hidráulica aplicada, todo o conteúdo foi drenado.

Assim, foi evidenciado que independentemente do tipo do geotêxtil, houve uma estabilização da taxa de vazão a partir de 30 minutos de ensaio. Além disso, foi verificado que à medida que aumentou-se a massa por unidade de área do geotêxtil houve uma redução da taxa de vazão, pois as partículas do lodo impediram a passagem do líquido (drenado), já que geotêxteis de massa por unidade de área grande apresentam abertura de filtração pequena, assim, as partículas de lodo depositadas sobre o geotêxtil podem ter sido maiores que as aberturas de filtração dos mesmos, provocando o impedimento da passagem do drenado. A partir de 30 minutos, o efeito da resistência do lodo tornou-se comum para todos os geotêxteis ensaiados, não sendo observada interferência do tipo de geotêxtil empregado e das propriedades do geotêxtil, as taxas de vazão tenderam a um mesmo valor por conta da formação do pré –filtro.

Apenas para o GT80 (Figura 56), houve uma diferença, pois para carga hidráulica H10 só houve estabilização da taxa de vazão com 60 minutos, diferentes das outras cargas hidráulicas (H30 e H50) que estabilizaram-se em 30 minutos.

Barroso (2007) salienta que taxas de drenagem mais elevadas, de acordo com as taxas que foram encontradas para estes ensaios, são determinantes para o desempenho do desaguamento, com a finalidade de diminuir o volume e tempo necessário ao desaguamento.

Semelhante ao que foi relatado por Minatel (2021), e destacado nos ensaios de desaguamento realizados por Santos (2012), houve uma redução da taxa de vazão drenada ao longo do tempo. Primeiramente foi observada a formação do pré-filtro, que comanda as ações de drenagem do lodo por um período e, após, um certo tempo, conforme estudaram Barroso (2007) e Mortara (2011) o decréscimo da vazão, ocorre pela obstrução dos poros do geotêxtil pelas partículas menores de lodo. Silveira (2012) também cita que o fenômeno da colmatção afeta diretamente a capacidade drenante do meio poroso, fazendo o fluxo diminuir à medida que os vazios diminuem.

Resultados semelhantes também foram observados por Minatel (2021) nos seus ensaios de desaguamento. Nos primeiros minutos de ensaio a taxa de drenagem foi proporcional à altura do lodo aplicado; onde leitos com maiores camadas de lodo apresentaram maiores taxas. Após um determinado instante do processo de drenagem, essa tendência se reverteu, fazendo com que os leitos com alturas menores de lodo aplicado tenham, de maneira geral, uma taxa de vazão superior aos leitos com maiores cargas. Esse comportamento pode ser justificado pela estabilização do pré-filtro formado pela sedimentação das partículas de lodo no fundo do leito, onde maiores alturas de lodo, conseqüentemente maiores TAS, formam uma camada sedimentada de maior espessura, diminuindo a taxa de vazão em relação aos leitos com TAS inferiores. O que também pode ter contribuído para este comportamento foi a interferência das propriedades do geotêxtil, destacando a abertura de filtração, conforme já explicado.

Tal comportamento evidencia a influência da sedimentação e da compressão das partículas de lodo no fenômeno do desaguamento em LD, sendo que à medida que ocorre a sedimentação dos sólidos e que a torta se desenvolve, aumenta a resistência à passagem do drenado, onde maiores camadas de torta apresentam maiores resistências. Concomitantemente, os leitos com maiores alturas de lodo aplicado possuem partículas submetidas a maiores compressões devido ao peso que as infinitésimas camadas de partícula exercem umas sobre as outras. Com isso, apresentam sólidos sedimentados

com maiores deformações, o que contribuiu também para decréscimo da taxa de desaguamento.

Barroso (2007) indica que na auto filtração, a ação de filtro não se restringi apenas ao geotêxtil, mas propaga-se para a camada adjacente, formando uma espécie de pré-filtro, em que as partículas retidas adjacentes às aberturas do geotêxtil tendem a redistribuir as tensões verticais devido à força de percolação e força da gravidade, e podem formar arcos que dificultam a passagem de partículas com diâmetros menores que as aberturas dos geotêxteis.

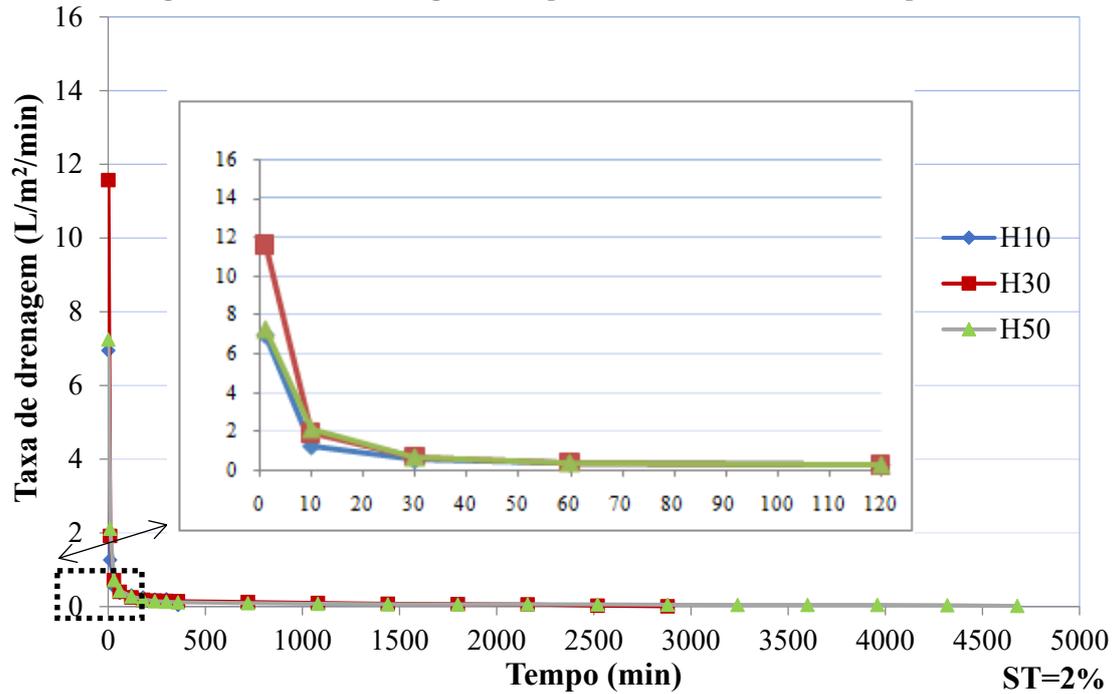
O tempo de drenagem observado por Barroso (2007) para lodo de sulfato de alumínio com ST de 0,2%, utilizando LD com H20 cm foi de 8 horas e a redução do volume de lodo na fase de drenagem ficou acima de 50%. Após 30 minutos, conforme os ensaios realizados na presente pesquisa, as vazões igualaram-se e tornaram-se constantes. Apesar de serem observadas Q_i menores, uma comparação mais detalhada foi impossibilitada, pois há diferença de unidade nos estudos. Barroso (2007) utilizou apenas L/min para a vazão. Já, Minatel (2021) que utilizou as mesmas unidades de vazão que esta pesquisa, obteve tempo de drenagem de 2 dias, porém, alguns ensaios não foram finalizados.

Os mecanismos de sedimentação das partículas também foram observados por Barroso (2007) que relata que a rápida sedimentação das partículas pode ter conferido maior dificuldade na drenagem de água livre.

Concluiu-se que na fase de drenagem, com a mistura na concentração de 2% de sólidos, a vazão de drenagem está mais relacionada com a TAS (kg/m^2) e com a magnitude do volume de lodo aplicado. Este aspecto é importante para construção de parâmetros de projeto.

A análise estatística realizada na pesquisa (item 4.5) comprovou esses fatos pois houve diferenças estatísticas nas massas retidas secas ao se empregar diferentes geotêxteis e independente do geotêxtil e da presença ou não de polímeros, a massa retida seca variou significativamente em função da carga hidráulica aplicada.

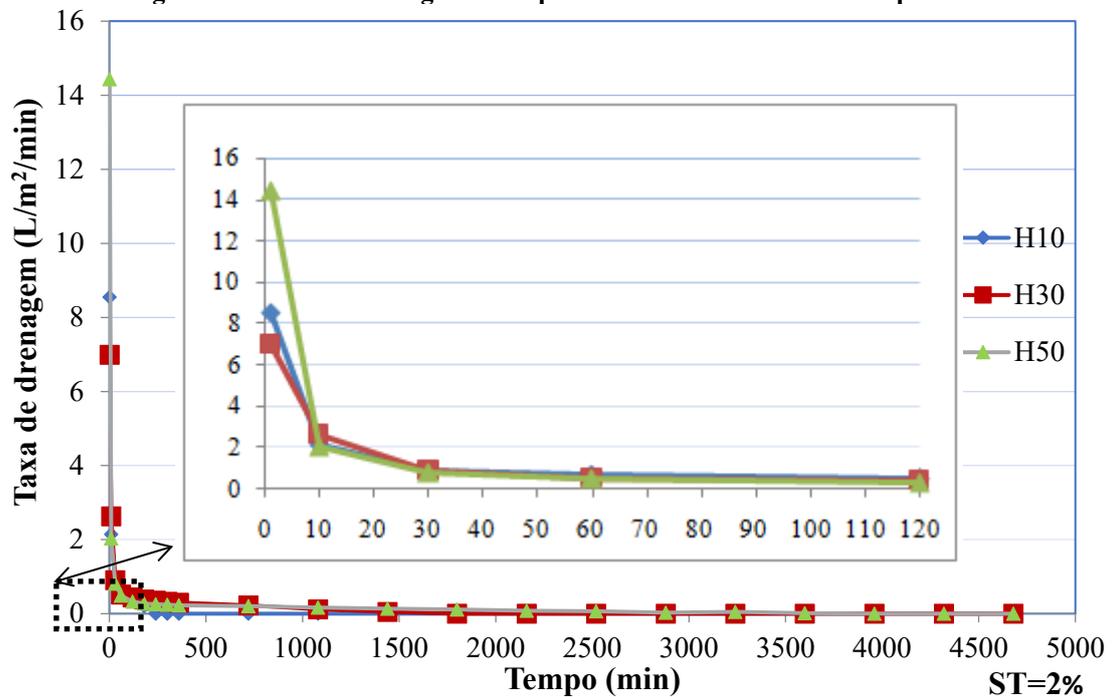
Figura 53- Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT400 - SP triplicata*



Fonte: autora

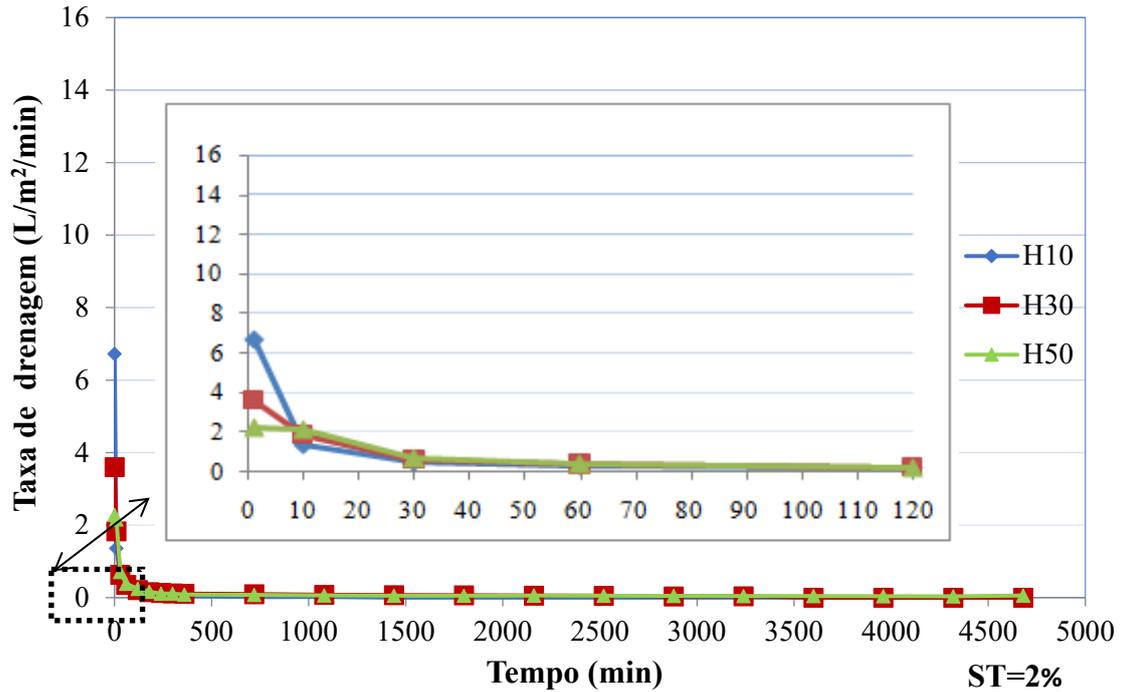
*Os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm não foram finalizados no período estabelecido na pesquisa (72 horas).

Figura 54- Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT600 - SP triplicata



Fonte: autora.

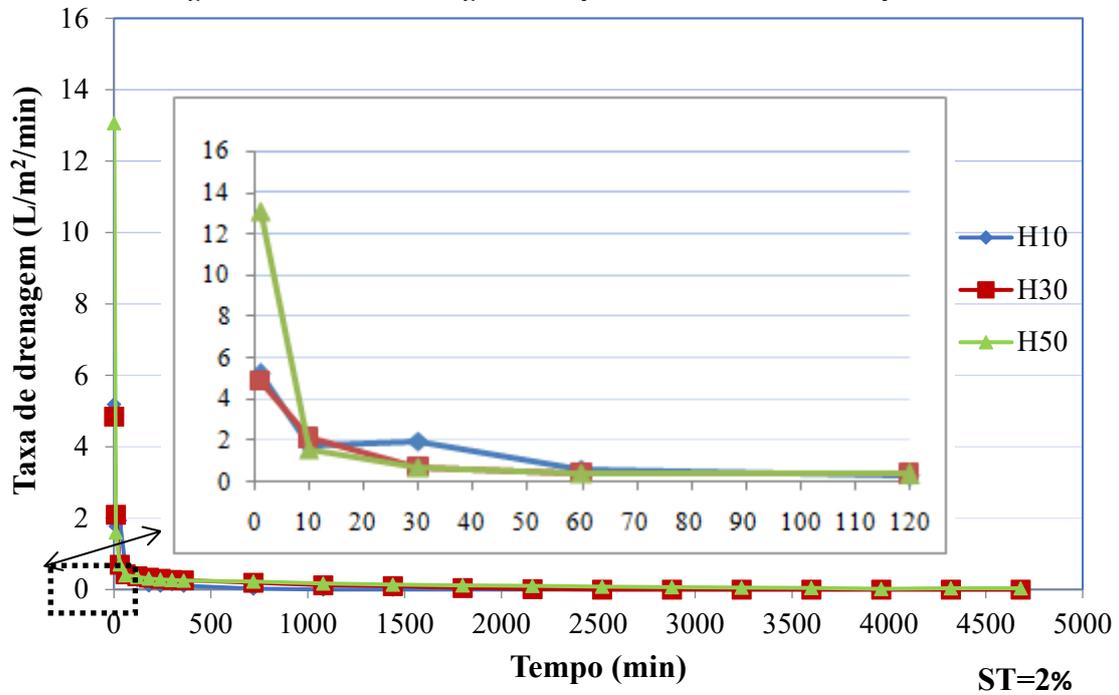
Figura 55- Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT900 SP- triplicata*



Fonte: autora

*Os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm não foram finalizados no período estabelecido na pesquisa (72 horas).

Figura 56 - Taxa de drenagem x tempo decorrido GT80 SP- triplicata



Fonte: autora

4.4.1.2 ENSAIOS CP- CONE

As Figuras 57 a 60 mostram os gráficos de taxa de drenagem por tempo decorrido dos ensaios com polímero, derivados dos ensaios de cone (CP - cone) realizados em triplicata dos respectivos geotêxteis (GTNT 400, 600, 900 e GT80). Todos os gráficos foram ampliados a partir do início dos ensaios (tempo= 0 min) até 120 minutos (2 horas) para observação da variação da taxa de drenagem inicial. Destaca-se que o cone facilita a sedimentação e, portanto, forma a torta mais rápido, através de uma maior resistência inicial à filtração.

Comparando com os ensaios SP, houve um aumento da taxa de Q_i para a maioria dos geotêxteis estudados. A estabilização da taxa de vazão ocorreu aproximadamente em 60 minutos, tempo maior que o observado para os ensaios SP, que foi de 30 minutos. Após 60 minutos, as taxas tenderam a um mesmo valor constante, por conta da provável formação do pré- filtro, que ocorreu mais tardiamente para esses ensaios.

Para os ensaios CP- cone não se pôde afirmar que maiores massas por unidade de área resultaram em maior Q_i , sendo observado o contrário, ou seja, menores massas por unidade de área, como o GTNT400 (Figura 57), por exemplo, apresentaram maior taxa de Q_i .

Analisando cada geotêxtil individualmente e comparando com os ensaios SP, o GTNT400 (Figura 57) apresentou maior taxa de Q_i para todas as cargas hidráulicas com menores tempos de ensaio.

O GTNT600 (Figura 58) apresentou menor taxa de Q_i para todas as cargas hidráulicas e menor tempo de ensaio para H10 e H50, exceto para H30, onde o tempo de ensaio foi maior. O GTNT900 (Figura 59) apresentou taxa de Q_i maior para todas as cargas hidráulicas, exceto para a H10 com taxa de Q_i menor. Em relação aos tempos de ensaio foram menores para todas as cargas hidráulicas. Por fim, para o GT80 a taxa de Q_i aumentou para todas as cargas hidráulicas, exceto para H50, e o tempo de desaguamento foram menores para todas as cargas hidráulicas. A diferença nos resultados destes ensaios com os SP, revelaram que existe uma interação do polímero com o geotêxtil estudado, conforme observada na análise estatística realizada mais à frente (tópico 4.5) pois ao aplicar o polímero, as partículas do lodo se agrupam, fazendo com que se consiga drenar a água mais facilmente, por conta da separação sólido – líquido.

Por isso, geotêxteis de menores massas por unidade de área que possuem abertura de filtração maiores, apresentaram maior taxa de Q_i , pois “deixam passar” uma maior quantidade de água mais rapidamente e durante um período maior de tempo, o que é explicada pela estabilização da taxa de vazão mais tardiamente para os geotêxteis analisados. A taxa de vazão estabilizou-se em 60 minutos, ou seja, o dobro de tempo para os ensaios SP. Após 60 minutos, houve a possível formação do pré – filtro pelas partículas aglutinadas (lodo+ polímero) até o final do período de desaguamento, e extinção da lâmina de água acima do geotêxtil, retardando uma possível colmatação do mesmo.

Cabe ressaltar, conforme consta no tópico 4.5 (análise estatística dos dados) que apenas o GTNT600 apresentou comportamento diferente, não mostrando inconformidade estatística na aplicação ou não de polímeros nos ensaios de desaguamento.

O pré- filtro, neste caso, é condicionado pela auto filtração e pela formação de uma rede de arcos, mecanismos responsáveis pela ação de um gradiente hidráulico sob o sistema lodo + polímero/geotêxtil, que provoca um fluxo d’água e induz a um rearranjo de partículas. A auto- filtração pode acontecer quando tem-se a ocorrência de um fluxo unidirecional e a atuação do filtro não fica restrita ao geotêxtil, e sim propaga-se para o lodo adjacente, onde se forma um filtro natural. No início do processo ocorre uma inevitável perda de partículas finas do lodo através do filtro natural formado no lodo e do filtro de geotêxtil sob o efeito do fluxo d’água, enquanto as partículas maiores são retidas no momento em que o diâmetro do poro fica menor do que a partícula. Estas partículas maiores retidas limitam um pouco as menores que, por sua vez, retêm partículas ainda menores, até que não seja possível nenhuma partícula de lodo migrar e, depois de algum tempo, o processo se estabiliza. Forma-se, nessa condição, uma zona de estrutura de filtro graduado no interior do lodo, nas proximidades do geotêxtil, denominada de pré-filtro (FREITAS, 2003).

Estes ensaios apresentaram tempos menores de desaguamento se comparados aos ensaios SP, pois todo o conteúdo colocado nos cilindros foi desaguado antes de 3 dias, não sendo observado material sobrenadante para todos os geotêxteis e cargas hidráulicas estudadas.

Vidal e Campos (2009) destacaram que a intenção em adicionar polímeros no processo de desaguamento é a formação de pontes químicas entre partículas em suspensão para formação de grumos ou flocos, o que permite que a retenção seja mais

eficiente e também diminui o risco de colmatação do geotêxtil pelo arraste de partículas finas. Além disso, o processo de coagulação permite a transformação de grande parte do material coloidal e dissolvido em fração particulada a qual é mais eficientemente removida no processo de filtração, de modo que os fenômenos de colmatação são minimizados, o que foi observado para este estudo.

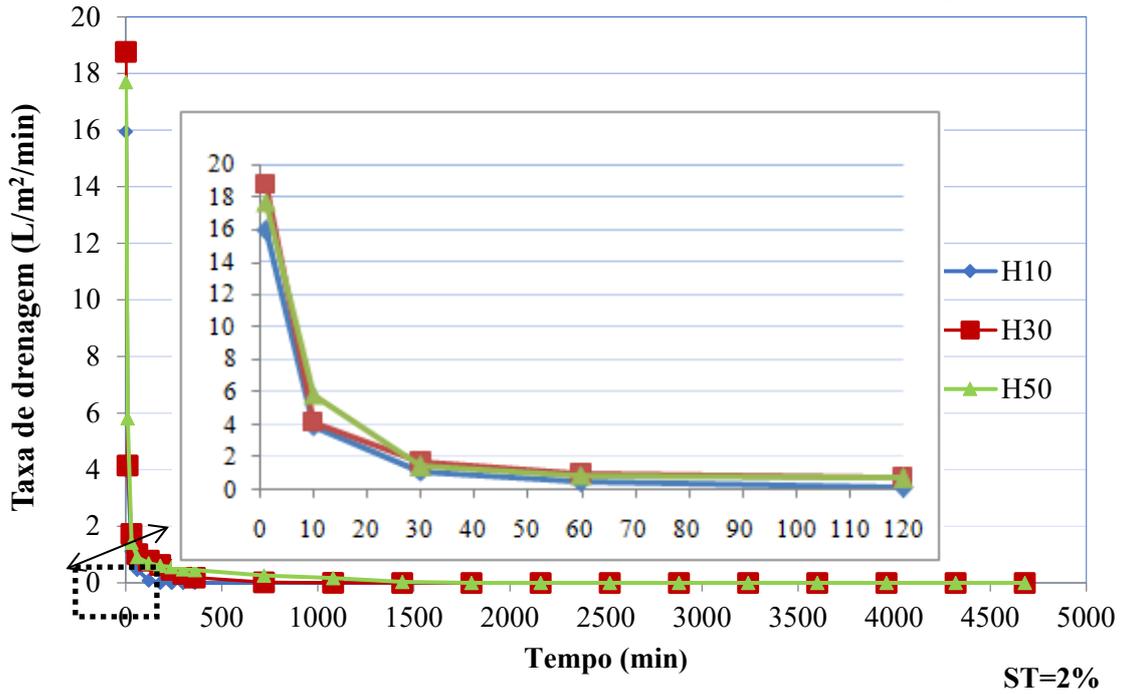
Gharaibeh (2009) relata que a aplicação de polímeros no desaguamento, aumenta consideravelmente a taxa de deságue. Para os ensaios CP- cone foram observadas maiores taxas de desaguamento se comparado com os ensaios SP.

Mortara (2011) obteve resultados semelhantes ao encontrados nesta pesquisa ao avaliar o tratamento de lodo de ETE pelo sistema de Leito de Drenagem aplicando polímeros como pré-tratamento, com vistas ao aumento da eficiência. O autor observou que o tratamento prévio com polímeros com adição de doses reduzidas, possibilitou menor tempo de drenagem.

Nos seus ensaios em escala piloto verificou-se que o condicionamento do lodo com doses de polímero ≥ 2 g/kgST aumentou significativamente a velocidade inicial de drenagem.

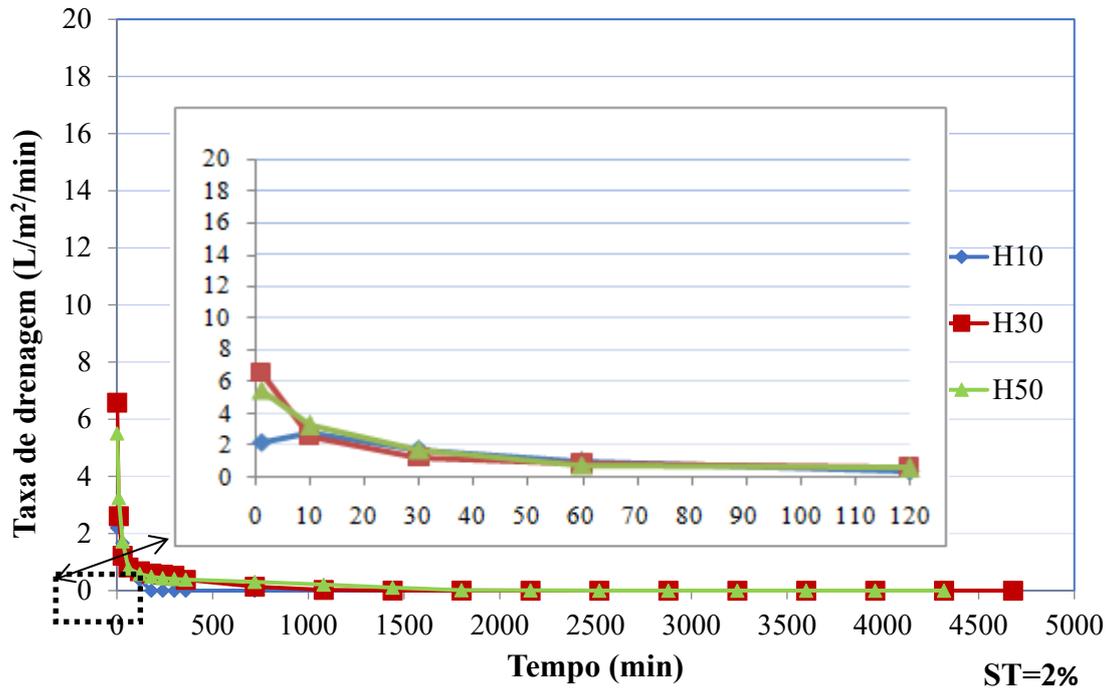
Mortara (2011) observou que os ensaios em escala piloto foram essenciais para validar as observações feitas em laboratório acerca do potencial de melhoria das propriedades do lodo e aumento significativo de sua capacidade de perder água pela adição de polímeros, mesmo com doses reduzidas, melhorando a drenagem, o que também foi observado para este estudo.

Figura 57 - Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT 400 - CP cone triplicata



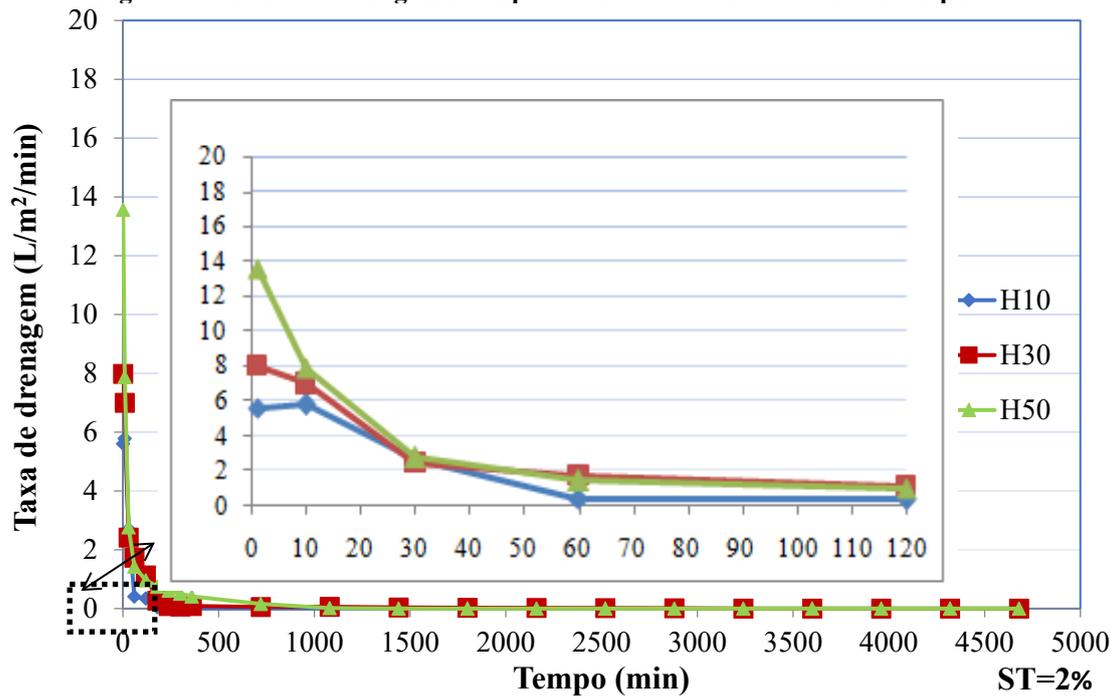
Fonte: autora

Figura 58 - Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT 600 - CP cone triplicata



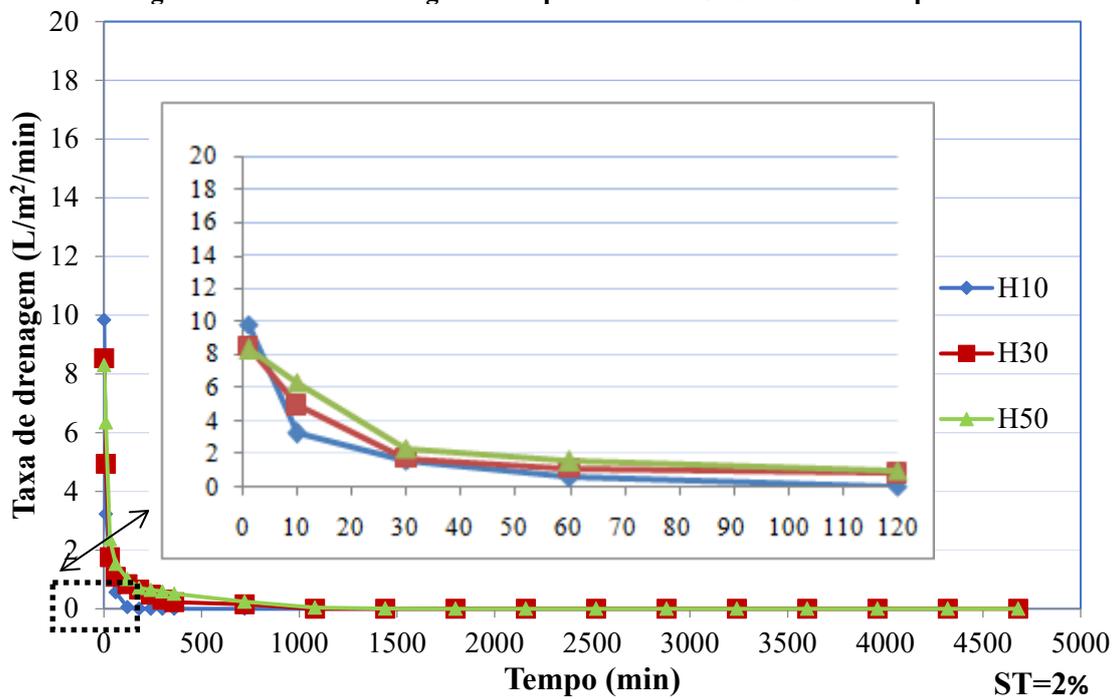
Fonte: autora.

Figura 59 - Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT 900 - CP cone triplicata



Fonte: autora

Figura 60 - Taxa de drenagem x tempo decorrido GT80 - CP cone triplicata



Fonte: autora

4.4.1.3 ENSAIOS CP – ALTERNATIVO

As Figuras 61 a 64 mostram os gráficos de taxa de drenagem por tempo decorrido dos ensaios com polímero, derivados dos ensaios alternativos (CP - alternativo) realizados em triplicata, dos respectivos geotêxteis (GTNT 400, 600, 900 e GT80). Todos os gráficos foram ampliados a partir do início dos ensaios (tempo= 0 min) até 120 minutos (2 horas) para observação da variação da taxa de drenagem inicial.

O GTNT400 (Figura 61) apresentou, independentemente da carga hidráulica estabilização da taxa de vazão a partir de 10 minutos. Resultado semelhante ao encontrado para o ensaio SP e diferente do encontrado para o ensaio CP-cone (que estabilizou a taxa de vazão em 60 minutos). Isso deu-se por conta da provável formação do pré- filtro. Para a carga hidráulica H50 a taxa de drenagem inicial foi mais alta do que as cargas hidráulicas H30 e H10, com taxas de drenagens iniciais semelhantes. Comparando-se com as taxas de drenagens iniciais dos ensaios CP – cone foram observadas taxas de drenagens iniciais menores para este geotêxtil.

O GTNT600 (Figura 62) apresentou maior taxa de drenagem inicial para a carga hidráulica H50 e estabilização da taxa de vazão em 30 minutos semelhante ao ensaio SP. As taxas de drenagens iniciais foram maiores que as observadas nos ensaios CP-cone.

Em contrapartida, para o GTNT900 (Figura 63) houve uma diferença, já que não foi observada estabilização da taxa de vazão e cada carga hidráulica apresentou um comportamento diferente. Somente a carga hidráulica H10 estabilizou-se em 30 minutos. Comparando com os ensaios CP – cone, a taxa de drenagem inicial foi maior para todas as cargas hidráulicas.

Já, o GT80 (Figura 64) mostrou resultados semelhantes com estabilização da taxa de vazão em 30 minutos, semelhante ao ensaio SP e taxas de drenagens iniciais mais baixas se comparados com os ensaios CP –cone.

Ao observar os gráficos, os resultados dos ensaios CP- alternativo (Figura 61 a 64) foram semelhantes aos resultados dos ensaios CP- cone (Figuras 59 a 62).

A análise estatística realizada no tópico 4.5 também mostrou resultados semelhantes entre os dois métodos de seleção de polímeros:

-Em relação a diferença entre o tipo de ensaio empregado para determinação do polímero (cone e alternativo), apenas para o GTNT600, independentemente da carga

hidráulica e o método para seleção do polímero, não houve diferença estatística para a massa retida seca;

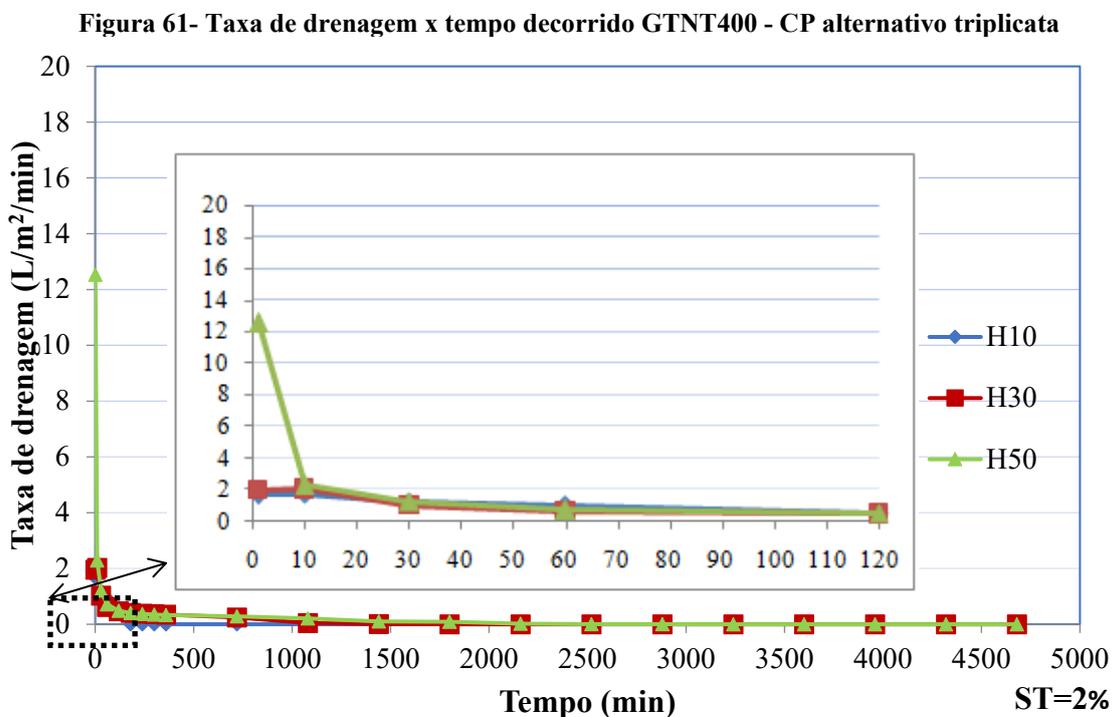
-Para o GT80 o método aplicado indicou diferença estatística;

-Para o GTNT400 e GTNT900 houveram diferenças estatísticas significativas da massa retida seca em função do método de seleção de polímero adotado, exceto, para H30 e H50, demonstrando que existe uma certa interação entre o método de seleção e o geotêxtil;

O critério de parada estabelecido para esses ensaios também foi de 72 horas, porém, conforme ocorreu com os ensaios CP-cone, estes ensaios apresentaram tempos menores de desaguamento, ou seja, todo o conteúdo colocado nos cilindros foi desaguado antes do período estabelecido.

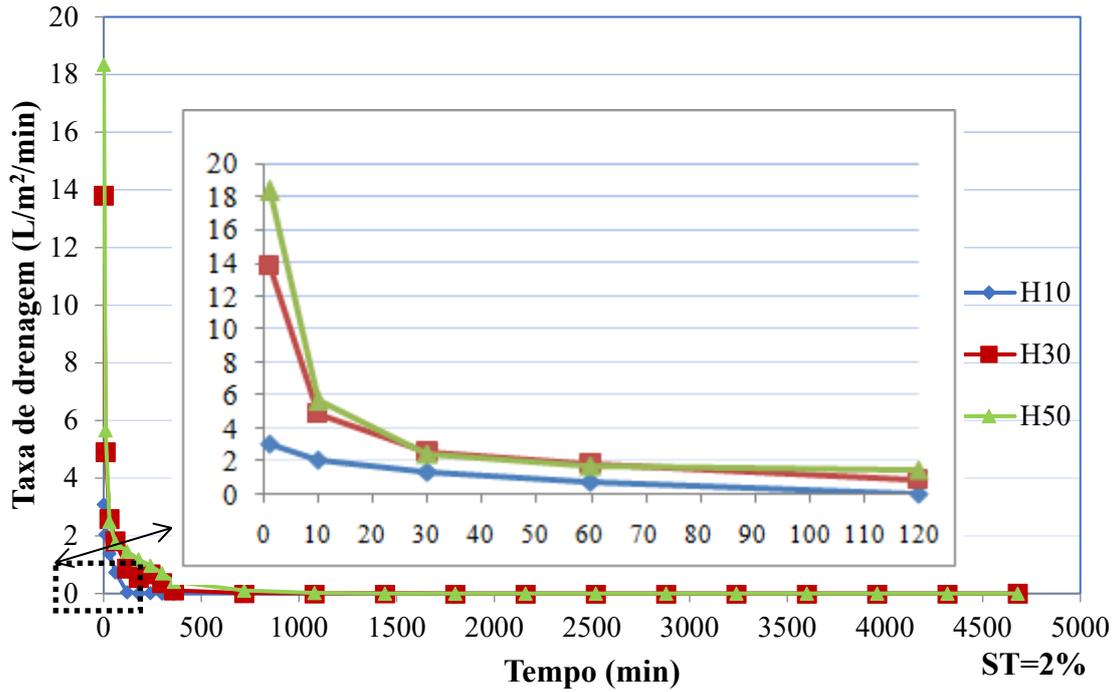
Foi observada a formação do pré- filtro de acordo com o que foi descrito por Freitas (2003) e Barroso (2007).

Gharaibeh (2009) e Mortara (2011) defenderam que a aplicação de polímeros aumentam as taxas de desaguamento, diminuindo o tempo de drenagem. Além de minimizar os fenômenos de colmatção, o que foi observado nos ensaios com a aplicação de polímeros realizados neste trabalho.



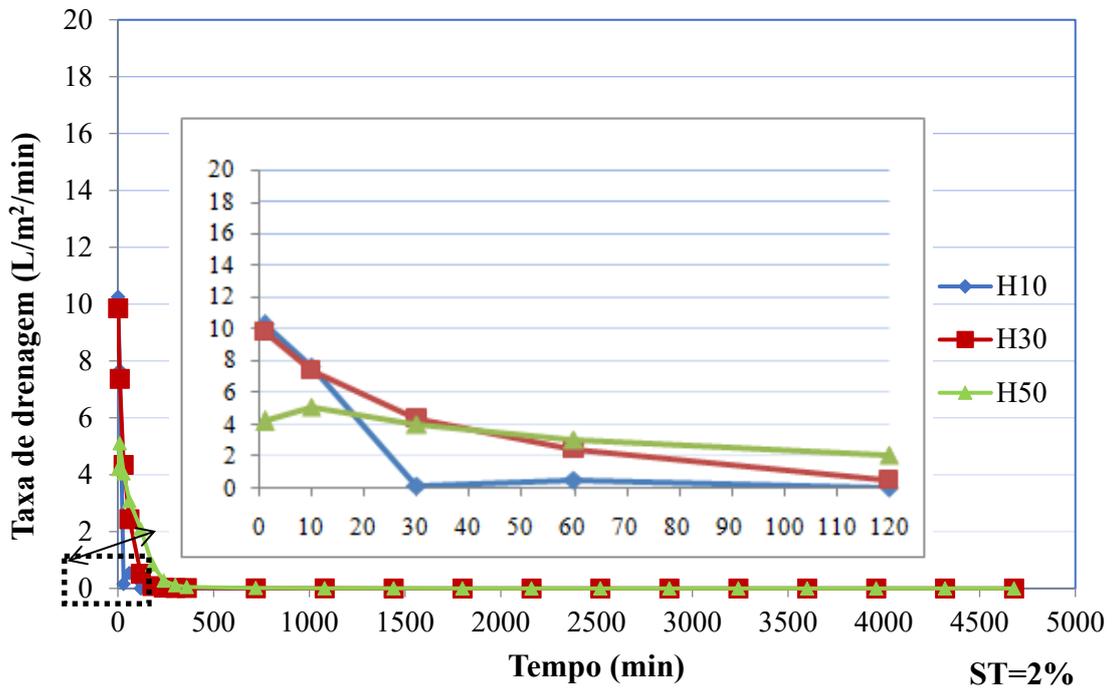
Fonte: autora

Figura 62- Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT600 - CP alternativo triplicata

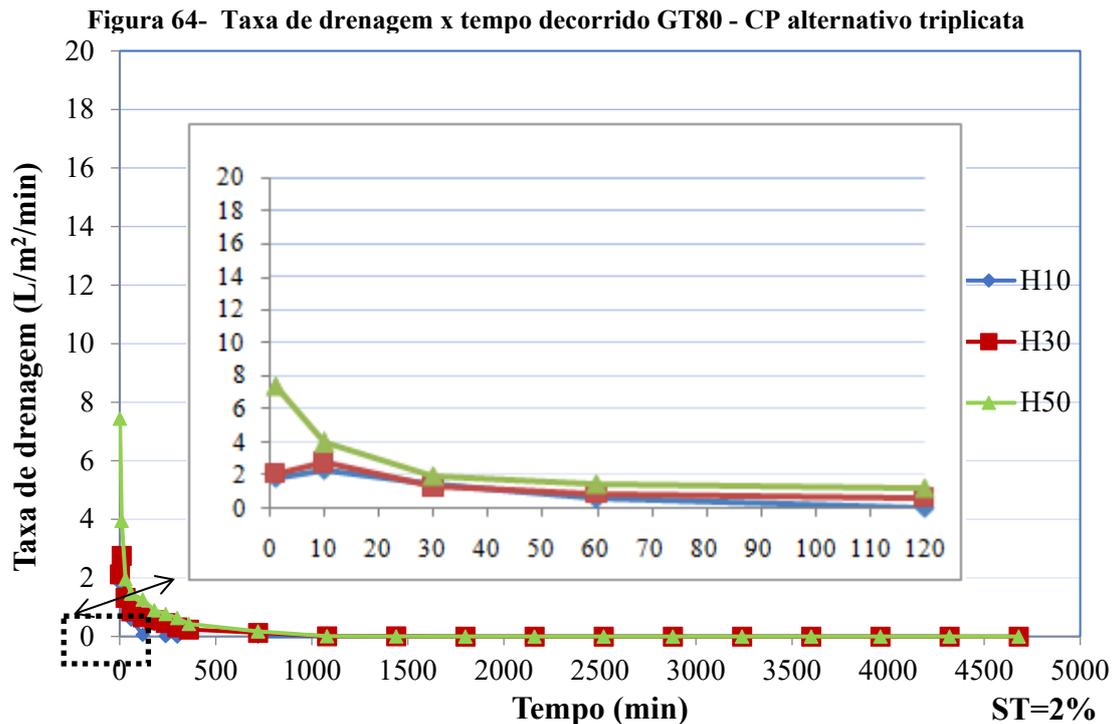


Fonte: autora

Figura 63- Taxa de drenagem x tempo decorrido GTNT900 - CP alternativo triplicata



Fonte: autora



Fonte: autora

A Tabela 53 apresenta um resumo dos resultados da taxa de Q_i e tempo de duração dos ensaios por tipo de configuração de ensaio realizado (SP, CP- cone e CP – alternativo) e geotêxtil.

O GTNT400 obteve taxas de Q_i maiores e tempo de duração de ensaio (tempo de desaguamento) menores com os ensaios CP- cone para todas as cargas hidráulicas ensaiadas. Para a carga hidráulica H10 a duração de ensaio foi semelhante para o ensaio CP –cone e CP- alternativo (120 minutos).

O GTNT600 apresentou taxas de Q_i maiores com os ensaios SP, exceto para carga hidráulica H50 que obteve Q_i maior com o ensaio CP- alternativo. Os tempos de duração dos ensaios foram diferentes, o menor tempo de desaguamento para carga hidráulica H10 foi com o CP – cone (120 minutos), para H30 os tempos foram semelhantes para os ensaios SP e CP – alternativo (1440 minutos), já, para o H50 o menor tempo ficou para o ensaio CP – alternativo (1080 minutos).

Para o GTNT900 as taxas de Q_i foram maiores e o tempo de duração dos ensaios menores com o ensaios CP – alternativo, exceto para carga hidráulica H50 que apresentou Q_i maior para o ensaio CP – cone. Para a H10 o tempo foi de 60 minutos, H30 foi de 1080 minutos e H50 foi semelhante ao tempo de duração do ensaio CP- cone (1440 minutos).

Já, o geotêxtil tecido GT80 resultou em Q_i maior e tempo de ensaio menores para os ensaios CP – cone. Para carga hidráulica H50 tempo de duração de ensaio do CP – alternativo foi semelhante ao CP – cone (1440 minutos).

Na maioria dos ensaios SP e CP (independente da metodologia de seleção utilizada) observou-se a formação do pré- filtro, que auxilia na estabilização da vazão e desaguamento do lodo. Sendo o pré –filtro o responsável pelo desaguamento desde sua formação até a completa extinção da lâmina líquida de água. Comparando os ensaios CP – cone e CP – alternativo os resultados foram semelhantes. Destaca-se que para os ensaios CP- cone a formação do pré- filtro foi mais tardia e isto está relacionado com a interação entre as propriedades do polímero, do lodo e do geotêxtil em questão, principalmente da abertura de filtração dos geotêxteis selecionados. A adição de polímeros pode aumentar a taxa de desaguamento e diminuir o tempo de drenagem, conforme consta na literatura. Os resultados encontrados no estudo da taxa de vazão dos ensaios concordaram com a análise estatística realizada à frente.

Tabela 53 - Resumo dos ensaios SP, CP- cone e CP- alternativo – Taxa de drenagem inicial e tempo de ensaio

Geotêxtil	SP			CP-cone			CP-alternativo		
	<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>		
	<i>Taxa de drenagem inicial (L/m²/min)</i>			<i>Taxa de drenagem inicial (L/m²/min)</i>			<i>Taxa de drenagem inicial (L/m²/min)</i>		
	<i>T (min)</i>			<i>T (min)</i>			<i>T (min)</i>		
<u>GTNT400</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	6,95	11,57	7,24	15,94	18,76	17,69	1,66	1,95	12,53
	360	2880	> 4680	120	1080	1440	120	1440	2880
<u>GTNT600</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	8,55	6,99	14,43	2,20	6,58	5,50	3,08	13,80	18,34
	180	1440	3960	120	1800	2160	240	1440	1080
<u>GTNT900</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	6,72	3,60	2,28	5,60	7,97	13,56	10,25	9,85	4,19
	1080	3240	> 4680	240	2880	1440	60	1080	1440
<u>GT80</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	5,18	4,84	13,06	9,83	8,53	8,30	1,82	2,12	7,44
	1440	2160	4680	120	720	1440	240	1440	1440

Fonte: autora.

4.4.2 Análise da variação do percentual de água livre drenada pela taxa de drenagem

Santos (2012) e Minatel (2021) nos seus ensaios de desaguamento sem a utilização de polímeros em leito de drenagem observaram uma redução da taxa de drenagem ao longo do tempo. Esses valores apresentaram comportamento inversamente proporcional ao acúmulo do drenado. Semelhante ao observado por estes autores, esse fato foi evidenciado para os ensaios realizados neste estudo com a utilização ou não de polímeros.

4.4.2.1 ENSAIOS SP

As Figuras 65 a 68 apresentam os gráficos de percentual de água livre drenada pela taxa de drenagem dos ensaios sem polímero (SP) em função do tempo realizados em triplicata, dos respectivos geotêxteis (GTNT 400, 600, 900 e GT80).

Conforme estipulado foram utilizadas 3 alturas de camadas de lodo no LD (H10, H30 e H50 cm), sendo 3 TAS diferentes para drenagem e conseqüentemente volumes drenados diferentes.

Observando o gráfico de percentual de água livre drenada e taxa de drenagem em função do tempo, para o GTNT400 (Figura 65) a carga hidráulica H10 foi a que apresentou maior remoção em menor tempo de ensaio, ou seja, 88,49% em 300 minutos. Para a carga hidráulica H30 têm-se 76,25% em 2880 minutos e para H50 62,24% em 4320 minutos. Ressalta-se que o ensaio com a carga hidráulica H50 apresentou maior tempo e menor remoção pois até o período de observação estipulado para esta pesquisa (72 horas) ainda restava material a ser drenado.

Em relação à porcentagem de água removida, para o ensaio GTNT400 SP H10 houve maior remoção de água em menor tempo se comparado com as outras alturas, apesar de apresentar TAS menor.

Atribuindo o volume drenado como parâmetro, para o GTNT400-SP, volume drenado foi maior quanto menor a carga hidráulica (H10, H30 e H50).

Na Figura 66, têm-se o percentual removido para o GTNT600. Semelhante a porcentagem de remoção do GTNT400 H10 (> 87%), a segunda maior remoção em menor tempo com a mesma carga hidráulica foi de 87,52% em 180 minutos, H30 obteve remoção semelhante em maior tempo, pois TAS maiores apresentam volumes drenados maiores e conseqüentemente demoram mais para drenar o material (83,59%

em 1080 minutos). A carga hidráulica H50 foi a que apresentou maior remoção (91,12%) em 1440 minutos.

Para o ensaio com carga hidráulica H50 todo o material foi drenado em 24 horas, o que não ocorreu com os ensaios utilizando o GTNT400 e 900 para a mesma carga hidráulica. Comparado aos outros geotêxteis, o bom desempenho do GTNT600 H50 apesar da TAS maior, é evidenciado, pois apresentou alta remoção de água livre drenada em curto período de tempo (91,12% em 24 horas). Para este geotêxtil o maior volume drenado foi com as cargas hidráulicas H10 e H50.

Para o GTNT900 (Figura 67) com carga hidráulica H10 demorou 360 minutos para conseguir 75,04% de remoção de água, o H30 obteve remoção semelhante, porém menor e em maior tempo (72,65% em 2880 minutos). Já, para a carga hidráulica H50 a remoção foi a menor observada em maior tempo, sendo removido em 4320 minutos 57,34% do material. Destaca-se que este geotêxtil, assim como o GTNT400 H50 não finalizaram no período estabelecido, apresentando ainda uma grande quantidade do material para ser drenado.

O GTNT900 apresenta abertura de filtração menor ($< 0,074$ mm), assim, maiores cargas hidráulicas, como a H50, indicam maiores vazões, com isso pode estar ocorrendo interferência do geotêxtil com o tamanho das partículas da mistura de lodo, com a consequente diminuição do volume drenado ocasionado pela deposição do lodo sobre o geotêxtil.

Para o GT80 (Figura 68) a maior remoção ficou para a H50 com 96,69% em 3600 minutos (2 dias e meio). Neste caso, a maior taxa de resultou em remoção em tempo maior. Para a carga hidráulica H30 conseguiu-se na metade do tempo observado para H50, ou seja, 1800 minutos uma remoção satisfatória $> 80\%$ (86,59%). Por fim, para o H10, foi observada a menor taxa de remoção em menor tempo (78,91% em 180 minutos).

Em relação aos geotêxteis não – tecidos (GTNT400 e 900) cargas hidráulicas menores apresentaram maior remoção de água em menor tempo, já, para o tecido (GT80) foi observado o contrário, ou seja, maior carga hidráulica apresentou maior remoção de água, conforme o que também foi observado por Minatel (2021).

Para o GTNT600 a maior remoção ficou entre H10 e H50, com remoção semelhante em menor tempo (87,52% em 180 minutos para o H10 e 91,12% em 1440 minutos para o H50).

Considerando apenas o volume drenado, excluindo a avaliação da qualidade, os melhores resultados foram com o GTNT600 e GT80 H50, com valores de remoção acima de 91% para ambos.

Conforme destacado por Freitas (2003), Barroso (2007) e Minatel (2021) em seus estudos e comprovado nessa pesquisa, a formação do pré- filtro auxilia na estabilização da vazão e quando ocorre sua formação a drenagem do material é condicionada pelo filtro desde o início até o fim da drenagem com a extinção da lâmina líquida de água.

Além disso, conforme Santos (2012) há a redução da taxa de vazão drenada ao longo do tempo, valores estes que apresentam comportamento inversamente proporcional ao acúmulo do drenado. Esse decréscimo da vazão alcança um certo limite, até que a mistura de lodo não consiga mais passar e ocorre uma possível obstrução dos poros do geotêxtil pelas partículas menores de lodo que poderá sofrer colmatação, diminuindo consideravelmente a capacidade drenante do meio (SILVEIRA, 2012).

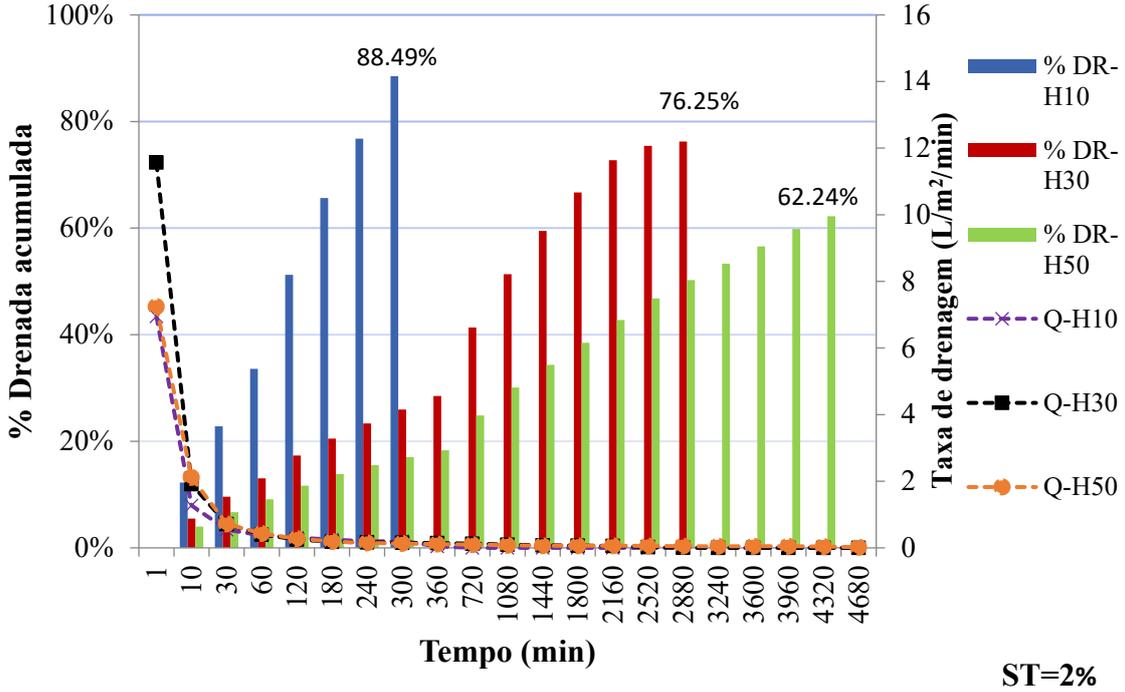
Minatel (2021) utilizando o GTNT600 com ST de 1% conseguiu redução de volume total do lodo aplicado de 95% para o leito com carga hidráulica H10 e 92% para os demais leitos (H20 H30, H40 e H50). Esses valores estão muito próximos dos encontrados por Silveira (2012), que em seus experimentos com lodos com % ST de 1,5% e 1,6% com $TAS=7,5\text{kg/m}^2$ alcançou valores de redução de 94% para ambos. No presente estudo, o GTNT600 também apresentou valores de remoção $> 90\%$ para carga hidráulica H50.

Neste caso, fica evidente a influência da carga hidráulica sobre a taxa de vazão, sendo que alguns LD com cargas hidráulicas de 50cm tiveram taxas de vazão maiores que os LD com carga hidráulica de 30cm. Porém, nem sempre maiores taxas de vazões foram responsáveis por menores tempos de drenagem, já que foi comprovado que à medida que ocorre o aumento da carga hidráulica, há, também, o aumento do tempo de drenagem e com menores cargas hidráulicas (H10 e H30) chegou-se a maior remoção em menor tempo para ensaios SP.

O aumento da carga hidráulica pode aumentar a taxa de Q_i , mas, isso não garantiu melhor remoção, neste caso.

Para todas as cargas hidráulicas estudadas quanto menor a taxa, menor o tempo de remoção, para maiores alturas (cargas) tempo de remoção foi maior.

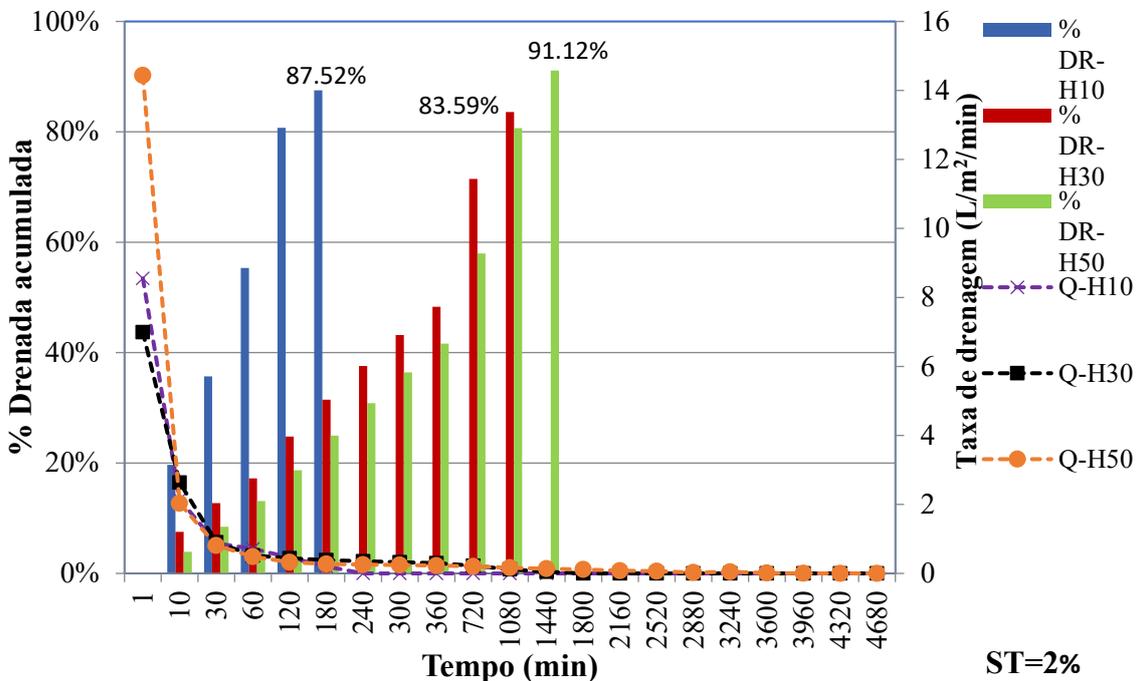
Figura 65 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT 400-SP triplicata*



Fonte: autora

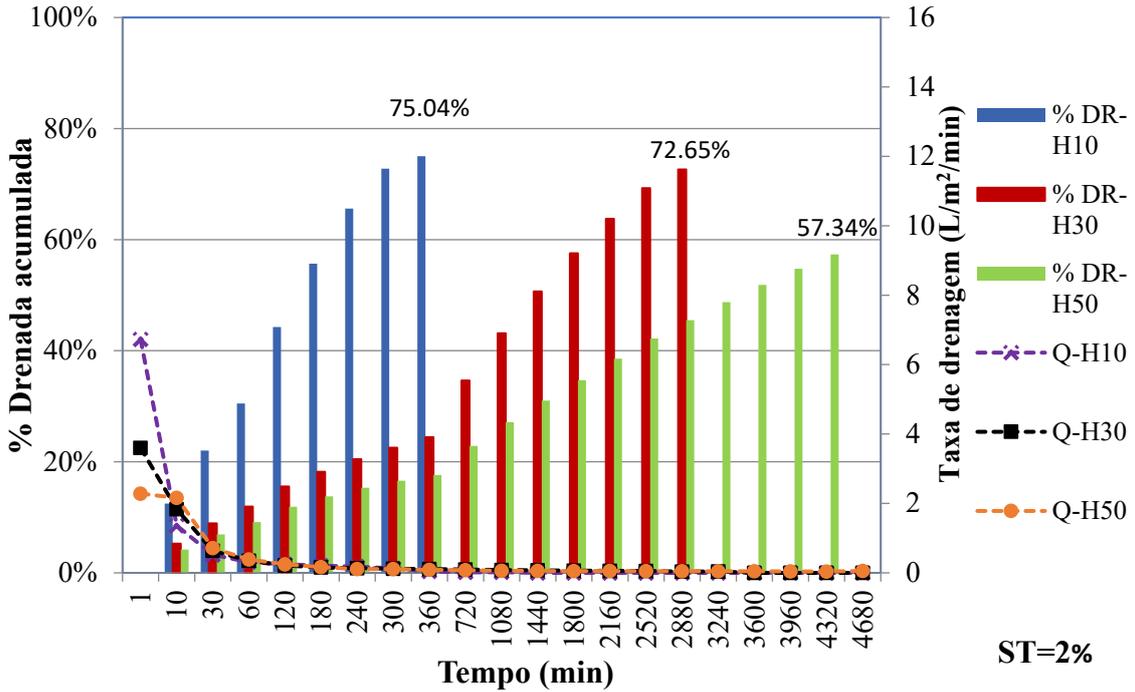
*Os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm não foram finalizados no período estabelecido na pesquisa (72 horas).

Figura 66 - Percentagem de água livre drenada x taxa de dreagem GTNT 600-SP triplicata



Fonte: autora

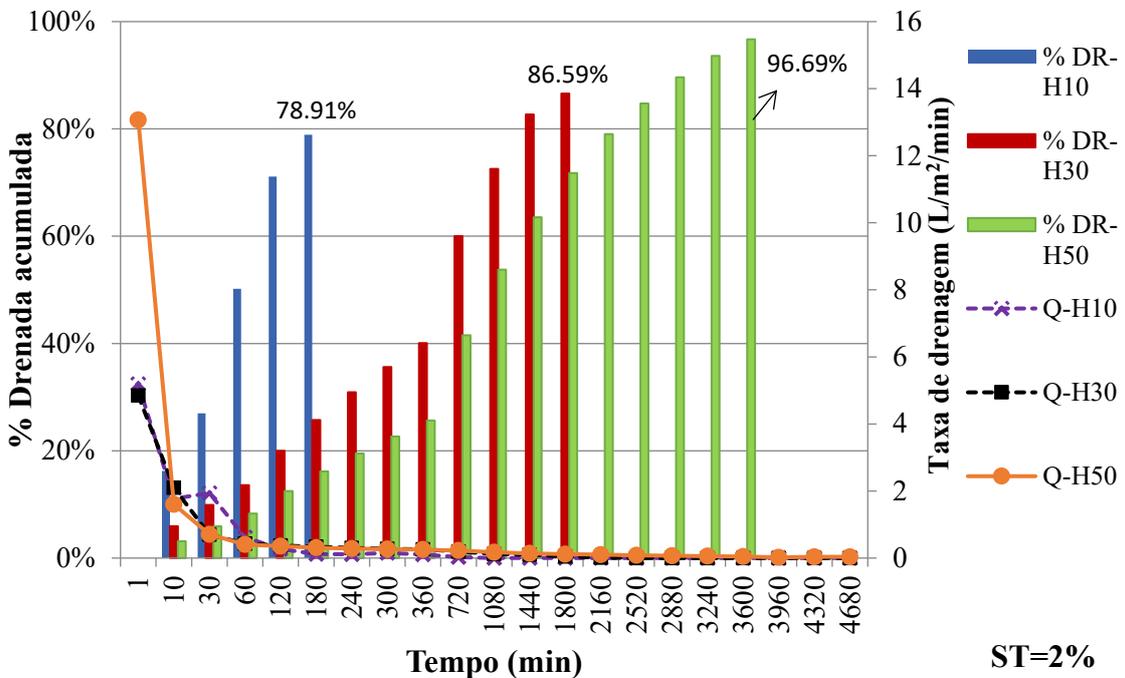
Figura 67 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT 900-SP triplicata



Fonte: autora

*Os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm não foram finalizados no período estabelecido na pesquisa (72 horas).

Figura 68 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GT80-SP triplicata



Fonte: autora

4.4.2.2 ENSAIOS CP- CONE

As Figuras 69 a 72 apresentam os gráficos de percentual de água livre drenada pela taxa de drenagem dos ensaios com polímero, derivados dos ensaios de cone (CP - cone) realizados em triplicata, dos respectivos geotêxteis (GTNT 400, 600, 900 e GT80).

Para o GTNT400, de acordo com Figura 69, com a carga hidráulica H10, obteve-se em 30 minutos, remoção de 59,56%. A H30 em 720 minutos removeu 74,38%. Já, a H50 obteve remoção semelhante em um mesmo período (74,46% em 720 minutos).

Comparado com o ensaio GTNT400 SP H10 (Figura 65) a remoção ocorreu em tempo menor com a utilização de polímero para a mesma carga hidráulica e geotêxtil.

Na Figura 70, tem-se o resultado da adição do polímero com o GTNT600. Para H10 a remoção foi de 81,99% em 60 minutos. Para H30 a remoção foi de 84,38% em 1080 minutos. A maior remoção ficou para carga hidráulica H50 com 90,36% em 720 minutos.

O ensaio GTNT600 CP- cone apresentou remoção semelhante ao ensaio GTNT600 SP (Figura 66), a diferença foi apenas no tempo de remoção, já que nos ensaios com polímero o tempo foi otimizado.

O GTNT900 (Figura 71) obteve em 30 minutos remoção de 47,59%, com a carga hidráulica H10, com a H30 a remoção foi de 79,22% em 360 minutos. Para a H50 a remoção foi semelhante ao H30 (80,13%), porém, no dobro do tempo observado para o mesmo (720 minutos).

A remoção observada para o GT80 (Figura 72) foi semelhante a do geotêxtil não-tecido (GTNT900), e ficando acima de 76% para todas as cargas hidráulicas estudadas. Para a H10 foi obtido 76,40% de volume drenado em 120 minutos. A carga hidráulica H30 em 360 minutos removeu 76,65% e a H50 76,67% em menor período de tempo (240 minutos).

O ensaio GT80 CP – cone H50, demorou 240 minutos para obtenção do volume drenado, em contrapartida, para o ensaio GT80 SP H50 (Figura 68) o tempo foi de 3600 minutos. Assim, o tempo do ensaio SP foi muito acima do observado para o CP – cone.

Para os ensaios CP- cone a taxa de desaguamento aumentou, ou seja, o desaguamento ocorreu rapidamente. O responsável por esta diminuição no tempo do desaguamento foi o polímero, que ao juntar-se com a mistura de lodo formou pontes

químicas entre as partículas em suspensão para obtenção de flocos, fazendo com que a retenção ocorresse mais rapidamente, diminuindo o risco de uma possível colmatação do geotêxtil pela mistura de lodo + polímero, conforme observaram Vidal e Campos (2009).

De acordo com Minatel (2021) a maioria dos estudos com LD utilizam o GTNT600, que é o recomendado por Cordeiro (2001) sendo o geotêxtil de melhor desempenho para esta finalidade.

Este geotêxtil apresentou melhor comportamento, promovendo a remoção do lodo aplicado ao sistema de LD, conforme já observado na literatura. Ao utilizá-lo, não se faz necessária a aplicação do polímero, (conforme descrito no tópico 4.5 - análise estatística). Neste caso, a aplicação do polímero gerou uma interação, não necessariamente melhorou a eficiência, mas, apresentou, tempo de drenagem otimizado.

Também foi verificada para o GTNT900 uma interação das propriedades do geotêxtil com o polímero (abertura de filtração), gerando aumento do tamanho do floco (partículas), impedindo a passagem de uma grande quantidade de água, como consequência obteve-se menor acúmulo de volume drenado.

O GT80, independente da carga hidráulica, apresentou mesma taxa de remoção.

Para os ensaios com adição de polímeros, todo o conteúdo colocado nos cilindros independente da TAS passaram pelos geotêxteis, o que não ocorreu para os ensaios SP utilizando o GTNT400 e 900.

Considerando apenas o volume drenado, excluindo a avaliação da qualidade, os melhores resultados foram com o GTNT600 H30 e H50 com valores de remoção acima de 84% para ambos.

A aplicação do polímero proporcionou remoção da água drenada em menor tempo. Para cargas hidráulicas maiores que possuem áreas de drenagens menores, além da otimização do tempo, a taxa de remoção aumentou, exceto para o ensaio utilizando o GTNT600 que apresentaram a mesma taxa de remoção para ensaios SP e CP, com otimização do tempo de drenagem para ensaios CP.

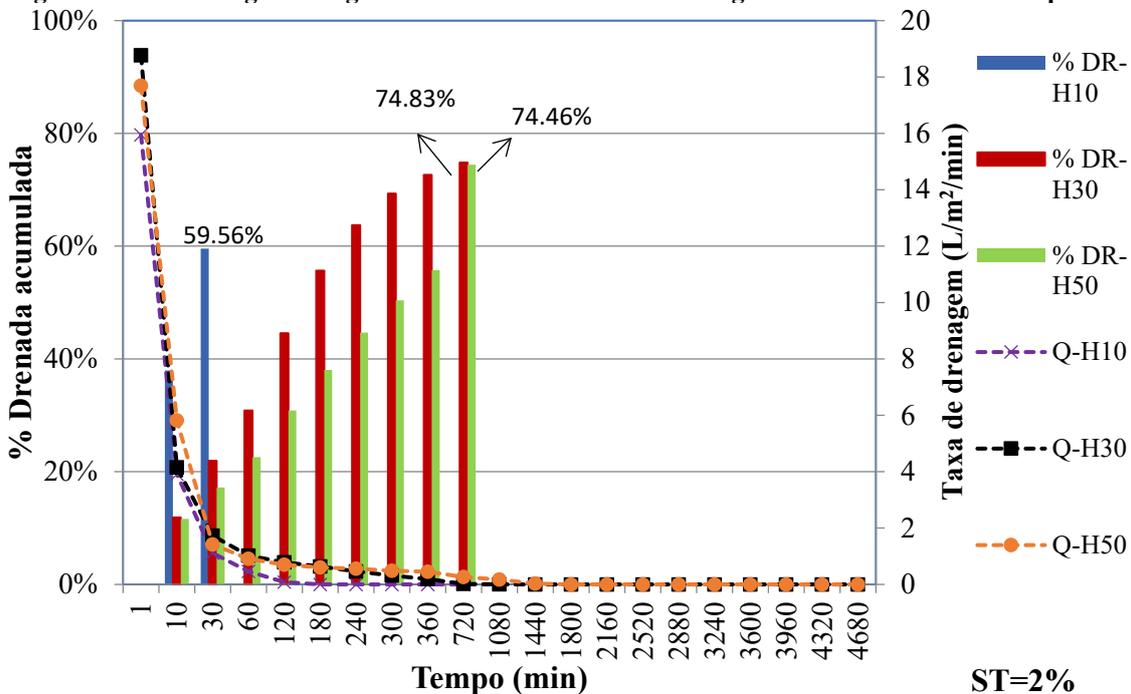
Para todos os ensaios SP o comportamento foi inverso, já que, maiores cargas hidráulicas apresentaram menor remoção em maior tempo.

Com cargas hidráulicas menores (H10) para o GTNT400 e 900 a interação entre mistura de lodo + polímero e geotêxtil, impediu a passagem de água e houve uma redução do drenado, apesar da otimização do tempo. Para este caso, quem controlou o processo de drenagem não foram as propriedades do geotêxtil e nem a carga

hidráulica, e sim a geração dos flocos, que pode até ter acarretado um possível bloqueamento no geotêxtil pela deposição rápida da fração particulada.

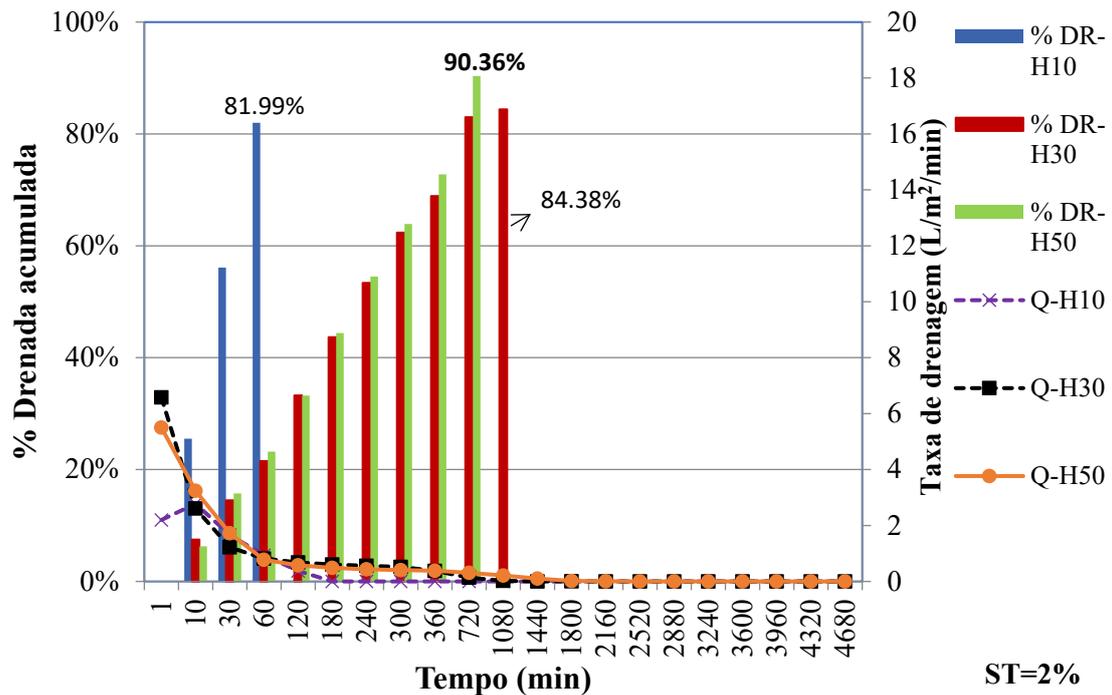
Apesar de poucos estudos com a aplicação de polímeros como condicionante no lodo, os autores (Barroso, 2007; Vidal e Campos, 2009; Gharaibeh, 2009 e Mortara, 2011) defendem que a adição de polímeros transforma o material coloidal e dissolvido em fração particulada a qual é mais eficientemente removida no processo de filtração, de modo que os fenômenos de colmatação são minimizados. Além de aumentar consideravelmente a taxa de desaguamento, otimizando o tempo de drenagem, o que foi comprovado para os ensaios CP- cone.

Figura 69 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT400- CP cone triplicata



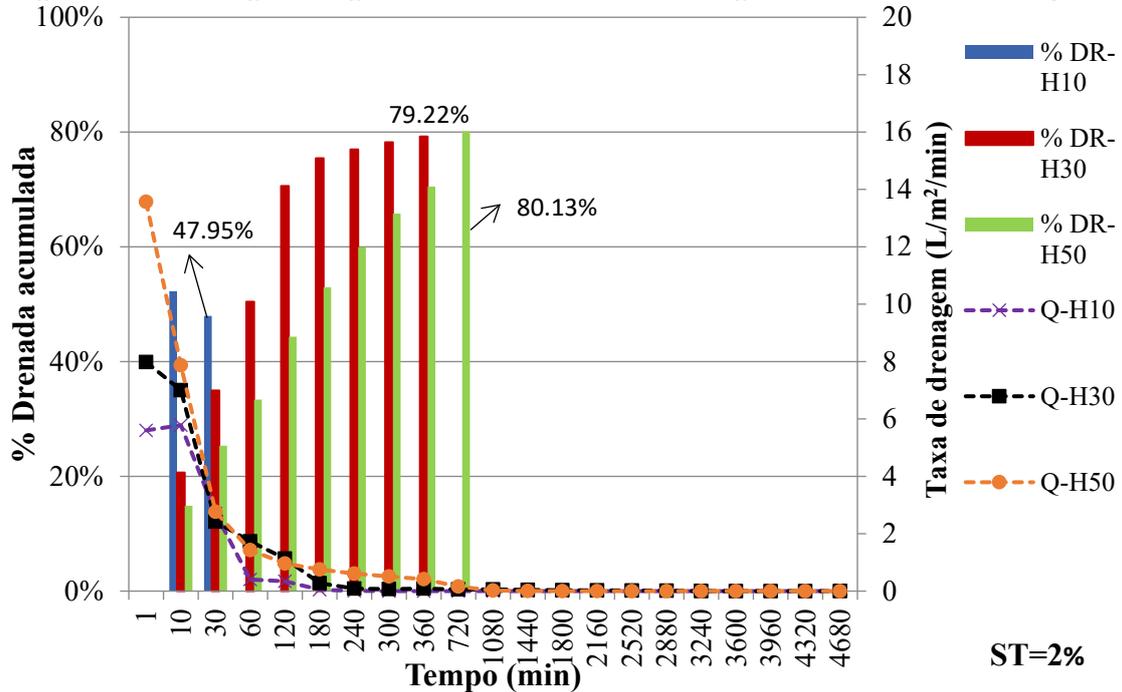
Fonte: autora.

Figura 70 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT600- CP cone triplicata



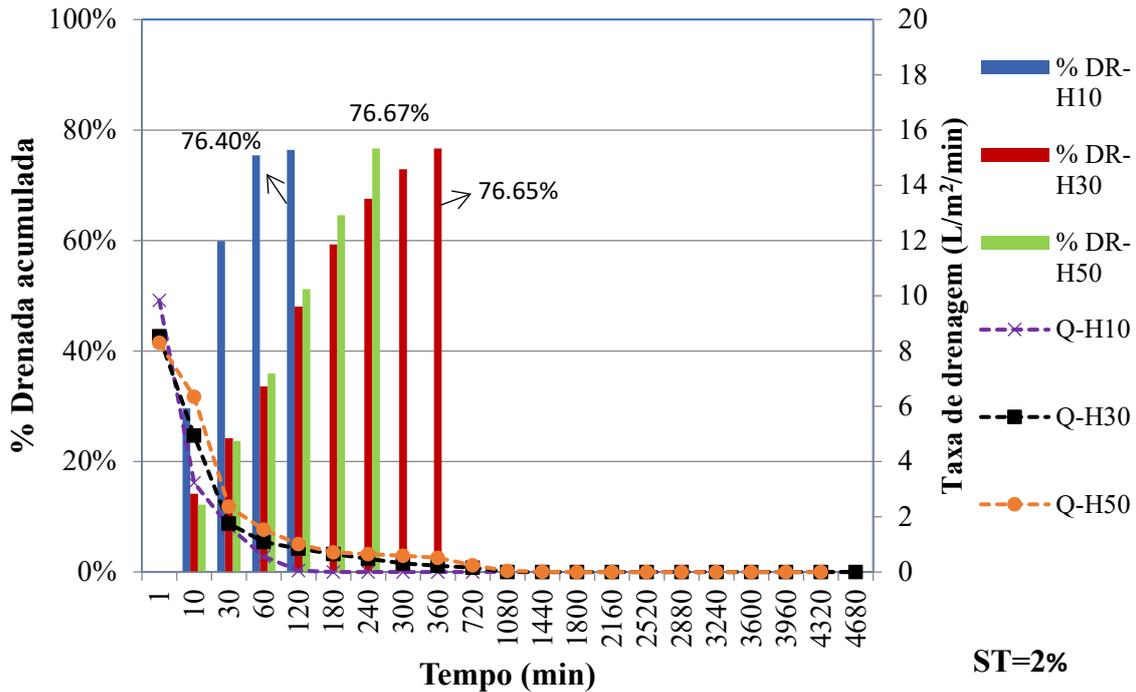
Fonte: autora

Figura 71 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT900- CP cone triplicata



Fonte: autora

Figura 72 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GT80- CP cone triplicata



Fonte: autora

4.4.2.3 ENSAIOS CP- ALTERNATIVO

As Figuras 73 a 76 apresentam os gráficos de percentual de água livre drenada pela taxa de drenagem dos ensaios com polímero, derivados dos ensaios alternativos (CP - alternativo), realizados em triplicata dos respectivos geotêxteis (GTNT 400, 600, 900 e GT80).

Na Figura 73, com o GTNT400 o percentual de água livre drenada foi de 71,95% em 120 minutos com a carga hidráulica H10. A H30 obteve 80,52% em 1080 minutos. Para a carga hidráulica H50 a remoção foi semelhante a H30, porém, em menor tempo (82,11% em 720 minutos).

Atribuindo o volume drenado como parâmetro, para o GTNT400 CP-alternativo, o volume drenado foi maior com a H50. Para as cargas hidráulicas H10 e H30 a remoção piorou. Comparando com os ensaios de cone (GTNT400 CP- cone), o tempo foi otimizado utilizando o método do cone em detrimento ao método alternativo, exceto para a carga hidráulica H50 que obteve o mesmo tempo nos dois ensaios (720 minutos). Destaca-se, também, que o volume drenado aumentou para todas as cargas hidráulicas com a utilização do método alternativo.

Para o ensaio GTNT400-SP H10 obteve-se remoção de 88,49%, em 300 minutos (5 horas), já, para o ensaio GTNT400 CP- alternativo H50 obteve-se remoção de 82,11%

em 720 minutos (12 horas). Isso comprova que a aplicação do polímero selecionado pelo método alternativo também reduziu o tempo de operação, como nos ensaios CP – cone para maiores cargas hidráulicas.

O GTNT600, conforme Figura 74 apresentou para a H10, 64,97% de remoção em 60 minutos. Com a carga hidráulica H30, remoção de 68,98%, um pouco acima e no triplo de tempo do observado para o H10, ou seja, 180 minutos. A maior remoção observada ficou para a carga hidráulica H50 com 93,02% em 240 minutos (4 horas).

Em relação ao GTNT600 para carga hidráulica H50, o ensaio SP apresentou porcentagem removida de 91,12% em 1440 minutos (24 horas). Para ensaio CP- cone foi de 90,36% em 720 minutos (12 horas) e para o CP –alternativo 93,02% em 240 minutos (4 horas), evidenciado a otimização do tempo, neste caso.

A Figura 75 apresenta o percentual de água livre drenada pela taxa de vazão para o GTNT900 que ficou acima de 73% para as cargas hidráulicas H10 e H30, com menor tempo observado para a carga hidráulica H10 (30 minutos) comparado a H30, onde a remoção ocorreu em 180 minutos. Para a carga hidráulica H50 foi obtida a maior remoção em um curto período de tempo (92,58% em 120 minutos- 2 horas).

Comparado aos ensaios CP- cone, o GTNT900 apresentou melhora com o ensaio alternativo, tanto na otimização do tempo como no aumento do percentual de água livre drenada. Já, para os ensaios SP apenas a carga hidráulica H10 apresentou maior porcentagem de água livre drenada (75,04%) em comparação ao método alternativo com a mesma carga hidráulica que foi de 73,34%. Em relação ao tempo, para todas as cargas hidráulicas observou-se otimização do mesmo com o método alternativo.

O geotêxtil tecido (GT80) obteve menores valores de água livre drenada para as cargas hidráulicas (H10 e H30). Para a H10 foi de 66,21% em 120 minutos e para a H30 74,66% em 1080 minutos. Esta configuração de ensaio foi a que apresentou maior remoção de todas as realizadas (SP, CP –cone) para a carga hidráulica H50 em um curto período de tempo (98,98% em 300 minutos), ou seja, 5 horas. Comparado ao ensaio CP- cone a porcentagem de água livre drenada foi maior e o tempo de drenagem menor para as cargas hidráulicas H10 e H30 com o método do cone, exceto para a H50 do método alternativo com 98,98% em 300 minutos. Os ensaios SP apresentaram maior percentual de remoção para o H10 e H30 com tempo de drenagem maior. Comparando a carga hidráulica H50 o valor obtido para o ensaio SP foi de 96,69% em 3600 minutos (2 dias e meio) em detrimento ao ensaio CP –alternativo com 98,98% em 300 minutos (5 horas).

Considerando apenas o volume drenado, excluindo a avaliação da qualidade, os melhores resultados foram com o GTNT600 H50 e GT80 H50, com valores de remoção acima de 93% para ambos.

Para os ensaios alternativos assim como nos ensaios de cone foi observada a otimização do tempo para todos os geotêxteis ensaiados. Mas, destaca-se que os ensaios alternativos aumentaram o percentual de água livre drenada da maioria dos geotêxteis (GTNT 400 para todas as cargas hidráulicas; GTNT600 H50; GTNT900 H10 e H50 e GT80 H50) comparado aos ensaios de cone.

Ao comparar com os resultados dos ensaios SP, têm-se maior taxa de remoção para o GTNT400 H10, GTNT600 H10 e H30 e GT 80 H10 e H30 com os ensaios SP, porém com tempos de remoção muito maiores.

Neste caso, o método alternativo além de otimizar o tempo de drenagem, aumentando a taxa de desaguamento, por conta da aplicação do polímero, conseguiu, também, aumentar a taxa de remoção. Analisando os resultados (dados de percentual de água livre drenada), a aplicação do método alternativo resultou em melhora da taxa de remoção de 58,33% de água comparado aos resultados dos ensaios SP e CP –cone. Ao analisar o tempo de remoção dos ensaios CP – alternativo e CP – cone houve empate entre a escolha dos dois métodos, já que 33,33% dos dados foram iguais para os dois métodos, 33,33% maiores para o CP- cone e 33,33% maiores para o CP – alternativo. Por fim, ao comparar o tempo de remoção dos ensaios CP – alternativo e SP, 100% dos dados obtiveram tempo de remoção menor para os ensaios CP – alternativo.

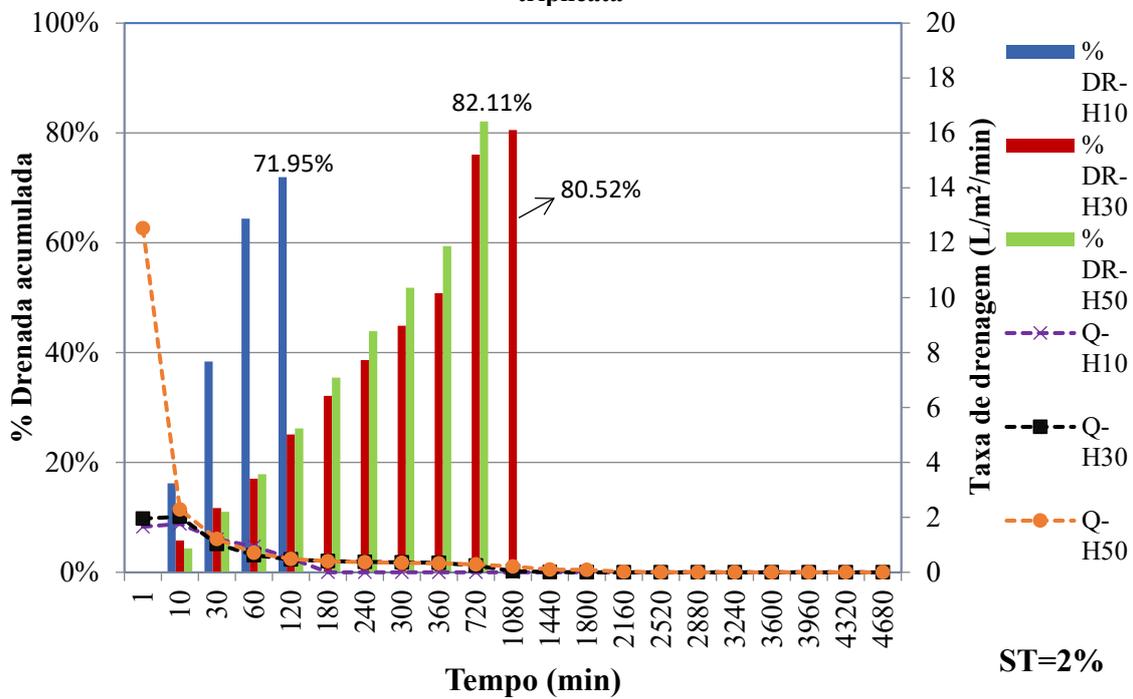
Assim, os resultados dos ensaios de LD com a aplicação do método alternativo além de resultarem em otimização do tempo de drenagem, aumentaram a taxa de remoção, pois ensaios SP apresentaram tempos maiores de remoção, apesar de alguns ensaios resultarem em taxas de remoção maiores para cargas hidráulicas menores. Já, para os ensaios CP- cone houve otimização do tempo e aumento do volume drenado para cargas hidráulicas maiores.

Em relação aos ensaios CP-alternativo, destaca-se que para o GTNT600 não houve diferença estatística na aplicação ou não de polímeros independentemente do método de seleção de polímeros adotado, apenas observou-se otimização do tempo de drenagem.

Houve interação entre o método aplicado e o tipo de geotêxtil empregado, fazendo com que aumentassem consideravelmente a taxa de desaguamento, otimizando o tempo de drenagem, o que foi comprovado neste estudo.

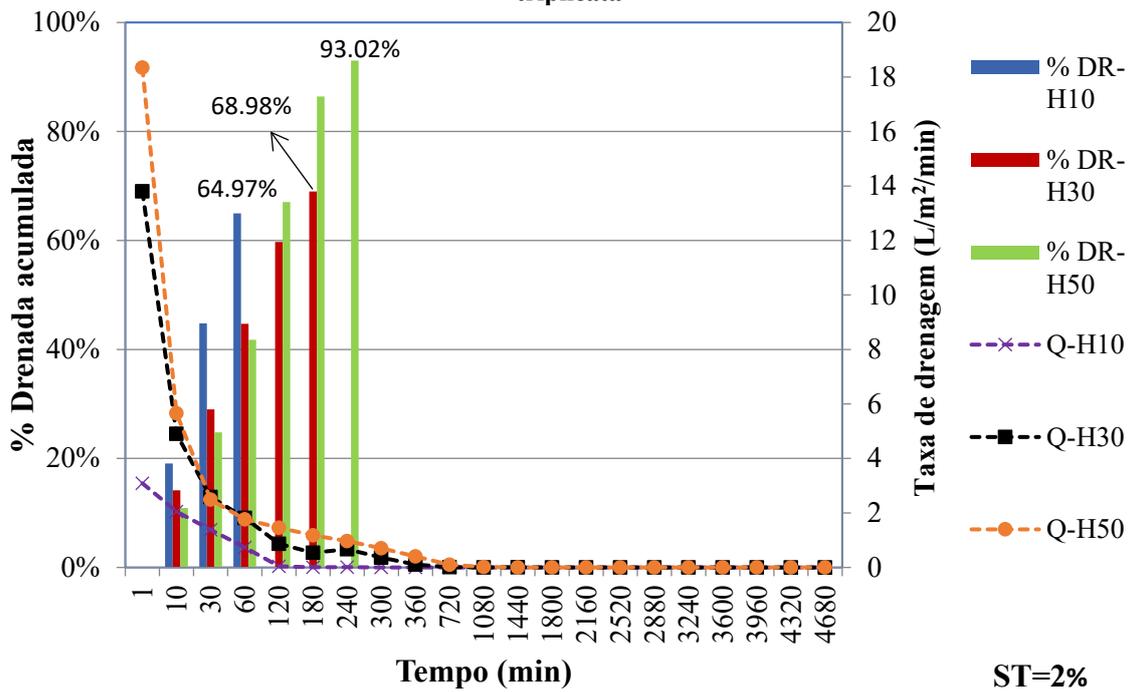
No subtópico 4.3 referente aos resultados e discussões dos métodos de seleção de polímeros, com o método alternativo foram obtidos volumes filtrados maiores nas amostras (da qual foi o requisito principal de seleção) com valores de turbidez maiores, porém, satisfatórias, comparado ao método de cone, com volumes e turbidez menores. Assim, os resultados dos ensaios alternativos foram replicados para os ensaios de LD que também apresentaram volumes filtrados maiores. Destaca-se, também, que essa configuração de ensaio é o que ocorre normalmente nos LD, pois, nesses sistemas, o fundo é plano e a transmissividade é constante.

Figura 73 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT 400- CP alternativo triplicata



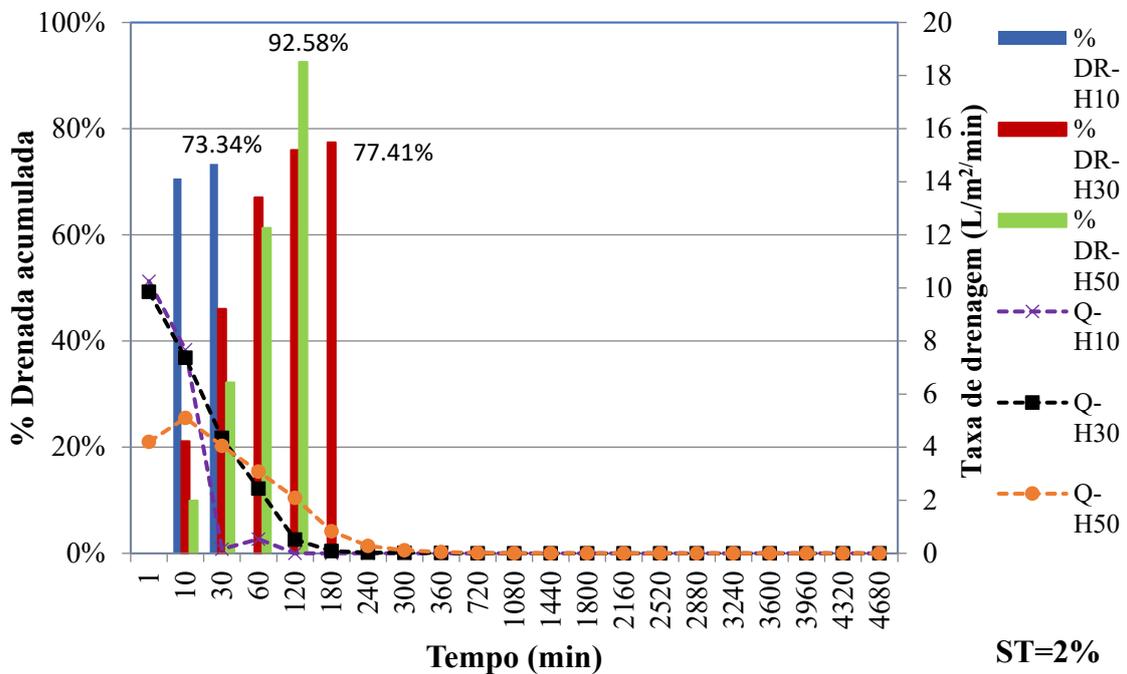
Fonte: autora.

Figura 74 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT 600- CP alternativo triplicata



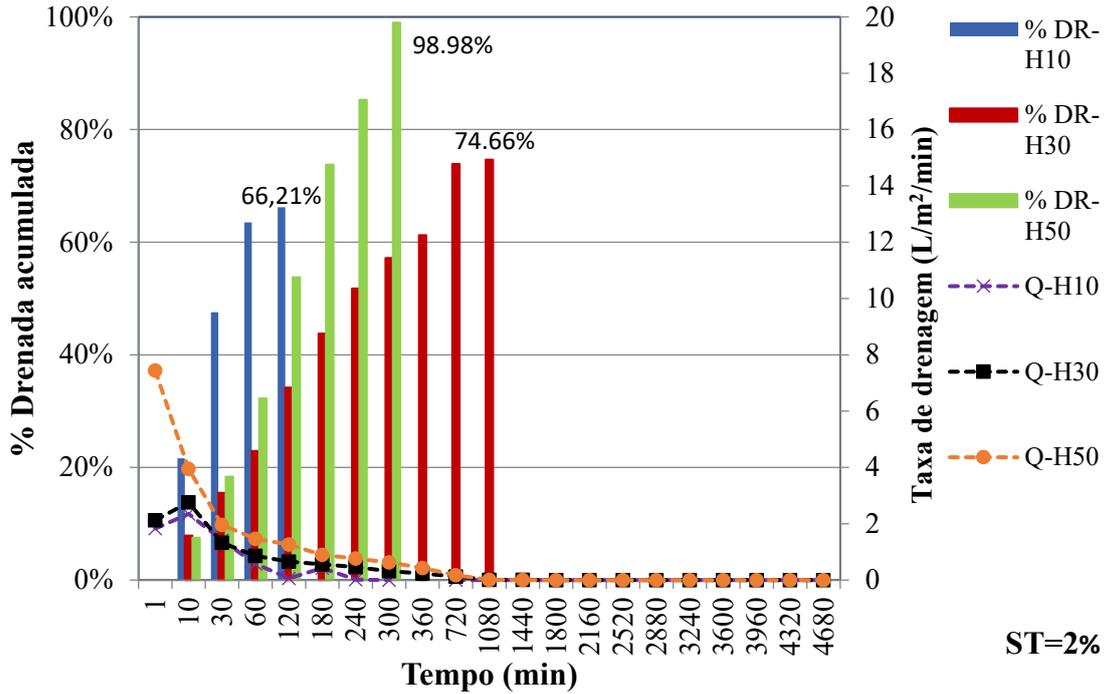
Fonte: autora.

Figura 75 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GTNT 900- CP alternativo triplicata



Fonte: autora

Figura 76 - Percentagem de água livre drenada x taxa de drenagem GT80- CP alternativo triplicata



Fonte: autora

Na Tabela 54 apresentam - se os resultados da percentagem de água removida e tempo de remoção dos ensaios, por tipo de configuração de ensaio realizada e geotêxtil.

Tabela 54 - Resumo dos ensaios SP, CP- cone e CP- alternativo – % removida e tempo

Geotêxtil	SP			CP-cone			CP-alternativo		
	<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>		
	<i>% removida</i>			<i>% removida</i>			<i>% removida</i>		
	<i>T (min)</i>			<i>T (min)</i>			<i>T (min)</i>		
<u>GTNT400</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	88,49	76,25	62,24	59,56	74,83	74,46	71,95	80,52	82,11
	300	2880	4320	30	720	720	120	1080	720
<u>GTNT600</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	87,52	83,59	91,12	81,99	84,38	90,36	64,97	68,98	93,02
	180	1080	1440	60	1080	720	60	180	240
<u>GTNT900</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	75,04	72,65	57,34	47,95	79,22	80,13	73,34	77,41	92,58
	360	2880	4320	30	360	720	30	180	120
<u>GT80</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	78,91	86,59	96,69	76,40	76,65	76,67	66,21	74,66	98,98
	180	1800	3600	120	360	240	120	1080	300

Fonte: autora.

4.4.3 Análise da massa retida seca no geotêxtil (M_R seca) e teor de umidade do lodo retido

Na Figura 77 observa-se as massas retidas médias secas em função da carga hidráulica para os ensaios SP, CP - cone e CP - alternativo dos geotêxteis GTNT400, 600, 900 e GT80 e na Figura 78 tem - se o teor de umidade do lodo médio pela carga hidráulica dos ensaios em triplicata para o mesmo tipo de configuração e geotêxtil.

A porcentagem de massa retida seca foi calculada através das médias das massas retidas secas em gramas dos ensaios realizados em triplicata de acordo com cada carga hidráulica (H10, H30 e H50) dividida pela média do volume colocado em cada cilindro em litros multiplicado pela quantidade de sólidos em gramas.

Na Figura 77a, correspondente ao GTNT400, destaca-se que o ensaio SP H10 foi o que apresentou maior porcentagem de massa retida seca (95,54%) e maior teor médio de umidade do lodo com 86,10% (Figura 78a), indicando uma torta (*cake*) com grande quantidade de água, apesar de retenção alta. Os valores de % M_R seca média foram maiores para todas as cargas hidráulicas menores (H10) independente da configuração do ensaio (CP – cone e CP – alternativo). Ou seja, quanto menor a carga hidráulica, maior foi a retenção no geotêxtil e maior teor de umidade do lodo, exceto para o ensaio CP – alternativo H10 com o menor teor de umidade do lodo (75,44%). O aumento da carga hidráulica indicou menor % massa retida seca no geotêxtil e menor teor de umidade do lodo retido, exceto para o ensaio CP – alternativo H50 com segundo maior valor de % M_R seca média (90,53%) e maior teor de umidade do lodo (82,27%) verificado para este tipo de ensaio. Para este geotêxtil os valores de % M_R seca média foram maiores que 80% e teor de umidade do lodo médio acima de 69% (Figura 78a), indicando uma torta mais compacta no ensaio CP – cone H30 com 69,85% de teor médio de umidade do lodo.

Para o GTNT400 o melhor resultado, ou seja, maior retenção com menor umidade foi para o ensaio CP- cone H30 com valores de 89,23% de M_R seca média e % médio de umidade do lodo de 69,85%.

A Figura 77b utilizando o GTNT600 mostrou comportamento diferente, pois a maior % M_R seca foi com o ensaio CP –alternativo H30 (99,24%) com o menor teor de umidade médio do lodo com 62,84% (Figura 78b). Isso demonstrou que a torta (*cake*) acima deste geotêxtil apresentou-se bem mais compacta que as outras, por conta da maior retenção de água observada, valores semelhantes foram obtidos para o ensaio H50 com % de M_R seca média de 92,66% e % médio de umidade do lodo de 68,98%.

Para a configuração alternativa, foram observadas % M_R seca maiores que 90% e teor de umidade do lodo acima de 62% (Figura 78b) Para os ensaios SP a maior % M_R seca e teor de umidade foi com a H10, para as outras cargas hidráulicas obtiveram-se valores de % M_R seca acima de 87% e teor de umidade do lodo acima de 75%. Já, nos ensaios CP – cone observou – se maior retenção (95,34%) para a carga hidráulica H50 com menor teor de umidade (75,27%), mostrando uma maior compactação da torta neste caso.

Para o GTNT600 os melhores resultados foram com o ensaio CP – alternativo H30 e H50 com % de M_R secas médias acima de 92 e % médios de umidade do lodo maiores que 62%.

Em relação à retenção, para os geotêxteis não –tecidos GTNT400 e GTNT600 (Figura 77a e 77b) obtiveram-se valores acima de 80% e teor de umidade do lodo acima de 62% (Figura 78a e 78b). Exceto com o GTNT900 (Figura 77c), o ensaio CP-cone H30 apresentou menor % M_R seca com 58,59%. Os teores médios de umidade do lodo ficaram acima de 70% (Figura 77c) e seguiram comportamento semelhante ao GTNT400 (Figura 77a), ou seja, à medida que se aumentou a carga hidráulica obteve-se menor teor de umidade do lodo.

Para o GTNT900 o melhor resultado, ou seja, maior retenção com menor umidade foi para o ensaio SP H30 com valores de 90,17% de M_R seca média e % médio de umidade do lodo de 70,18%.

Em relação ao geotêxtil tecido GT80 (Figura 77d) os ensaios SP para todas as cargas hidráulicas analisadas foram o que apresentaram a menor % M_R seca com 36,07% para a H10, 54,95% para a H30 e 37,59% para a H50. Com a aplicação do polímero para o ensaio CP- cone foi obtida a maior % M_R seca observada com 99,47% para a carga hidráulica H50. Para essa configuração de ensaio, o teor médio de umidade do lodo (Figura 78d), seguiu o mesmo comportamento do GTNT400 (Figura 77a) e GTNT 900 (Figura 77c), ou seja, maiores cargas hidráulicas apresentaram menores teores médios de umidade de lodo. Para o ensaio CP –alternativo a % M_R seca foi maior que 81% e o teor médio de umidade do lodo acima de 83%. Neste caso, ficou evidente que com o geotêxtil tecido a aplicação de polímeros aumentou significativamente a % de M_R seca média (99,47%), com % de umidade do lodo médio menor observado (75,41%) com o ensaio CP –cone H50. Além disso, foi verificada diferença nas massas retidas médias secas entre os dois métodos de seleção de polímeros, conforme o que também foi comprovado na análise estatística para este geotêxtil, já que a aplicação

de polímeros aumentou a % de M_R seca média, mantendo uma torta com menor umidade.

Para o GT80 o melhor resultado, ou seja, maior retenção com menor umidade foi para o ensaio CP- cone H50 com valores de 99,47% de M_R seca média e % médio de umidade do lodo de 75,41%.

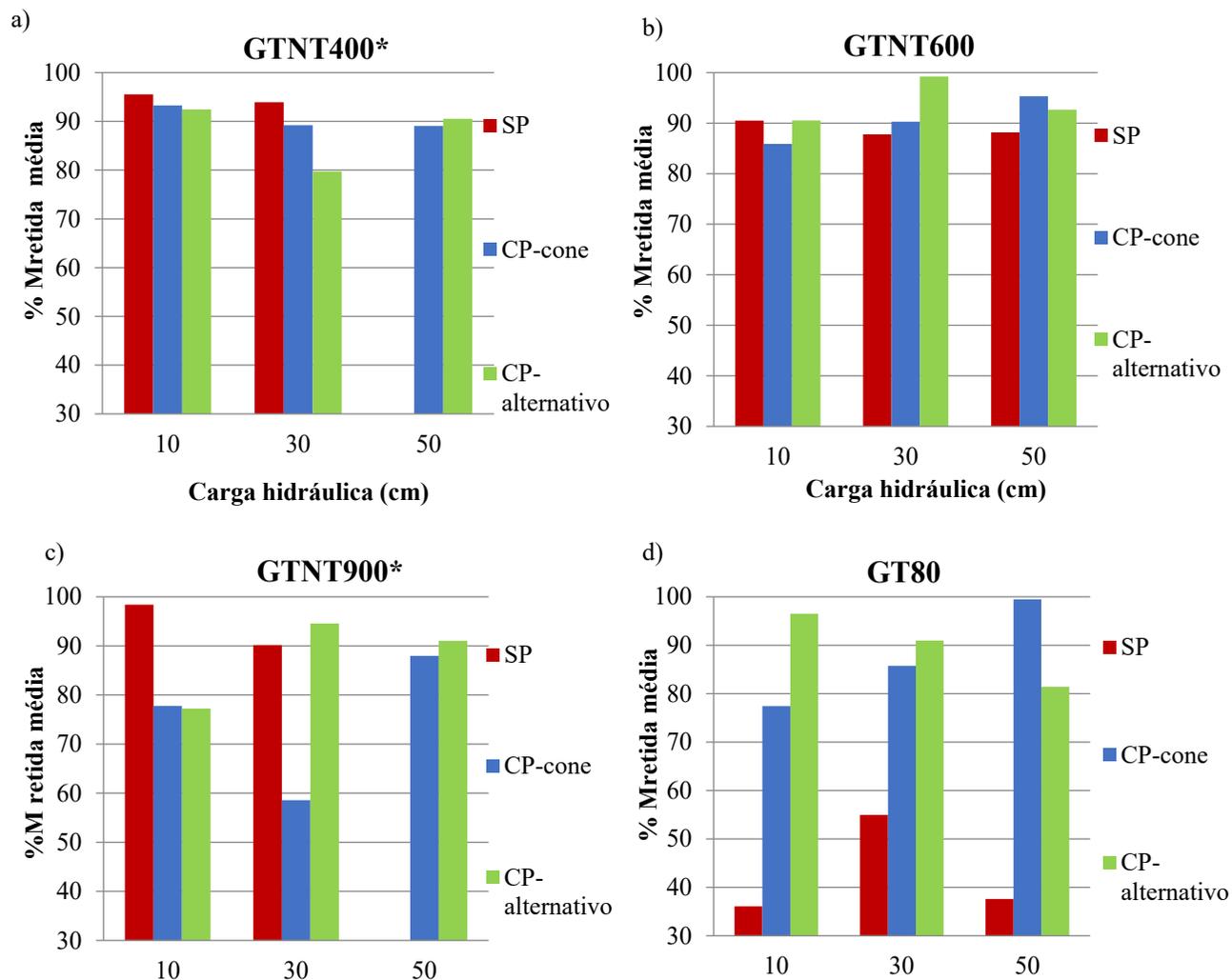
Em relação à carga hidráulica aplicada, para H50, a % M_R seca média e teor médio de umidade do lodo dos geotêxteis (GTNT400 e GTNT900 SP) não foram calculados, porque em 3 dias de observação não havia 40% do volume de lodo a ser drenado.

Conforme comprovado na análise estatística, existem diferenças estatísticas nas massas retidas secas ao se empregar diferentes geotêxteis e independentemente do geotêxtil e da presença ou não de polímeros, a massa retida seca variou significativamente em função da carga hidráulica aplicada. Ainda assim para o GTNT600 não foi verificada diferença estatística na massa retida seca com aplicação ou não de polímeros. Já, para o GT80 a diferença foi evidente, já que a aplicação de polímeros aumentou consideravelmente a % de M_R seca média, mantendo a torta (*cake*) mais compacta.

Os resultados de % de M_R seca média encontrados concordam com a discussão realizada no item 4.4.2 referente à análise da porcentagem de água livre drenada pela taxa de vazão.

Na Tabela 55 apresenta-se um resumo dos valores referentes as massas retidas secas médias e os teores de umidade do lodo médios pela carga hidráulica dos ensaios discutidos neste tópico.

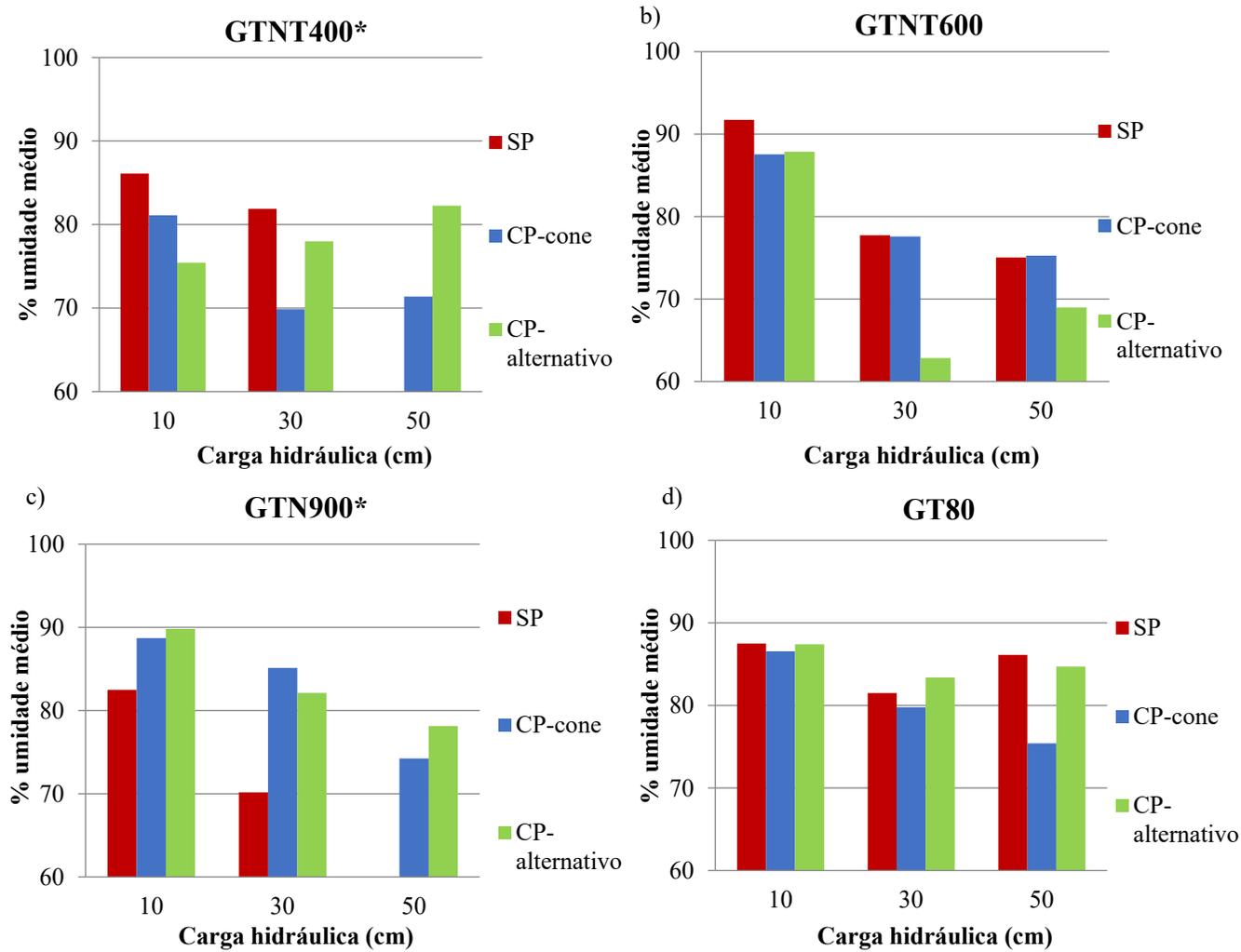
Figura 77- % Massa retida média x carga hidráulica para os ensaios SP, CP- cone e CP - alternativo a) GTNT400; b) GTNT600; c) GTNT900 e d) GT80



Fonte: autora.

*Para os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm não foram calculadas as % das massas retidas médias, pois esses ensaios não foram finalizados no período estabelecido na pesquisa (72 horas).

Figura 78 - Teor de umidade do lodo x carga hidráulica para os ensaios SP, CP- cone e CP - alternativo a) GTNT400; b) GTNT600; c) GTNT900 e d) GT80



Fonte: autora.

*Para os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm não foram calculados o teor de umidade do lodo, pois esses ensaios não foram finalizados no período estabelecido na pesquisa (72 horas).

Tabela 55 - Massa retida média (%) e teor de umidade do lodo médio para os ensaios SP, CP-cone e CP-alternativo: GTNT400, GTNT600, GTNT900 e GT80

Geotêxtil	SP			CP-cone			CP-alternativo		
	<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>		
	<i>Massa retida média (%)</i>			<i>Massa retida média (%)</i>			<i>Massa retida média (%)</i>		
	<i>Teor de umidade do lodo médio (%)</i>			<i>Teor de umidade do lodo médio (%)</i>			<i>Teor de umidade do lodo médio (%)</i>		
<u>GTNT400</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	95,54	93,34	-	93,28	89,23	89,05	92,45	80,00	90,53
	86,10	81,89	-	81,11	69,85	71,39	75,44	77,99	82,27
<u>GTNT600</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	90,51	87,79	88,16	85,91	90,28	95,34	90,53	99,24	92,66
	91,73	77,74	75,04	87,55	77,59	75,27	87,85	62,84	68,98
<u>GTNT900</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	98,38	90,17	-	77,77	58,59	87,97	77,24	94,54	91,03
	82,48	70,18	-	88,71	85,13	74,25	89,82	82,12	78,12
<u>GT80</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	36,07	54,95	37,59	77,43	85,75	99,47	96,50	90,97	81,41
	87,50	81,51	86,11	86,56	79,77	75,41	87,41	83,39	84,71

Fonte: autora

4.4.4 Análise da Qualidade dos Drenados

A finalidade principal e que confere eficiência a um sistema de LD é a remoção da água. Nesse sentido, quando da sua criação e funcionamento são atendidos os aspectos quantitativos referentes ao projeto.

Assim, neste tópico foram avaliados os parâmetros referentes à qualidade, como: ST e eficiência de filtração, SST, SDT e eficiência de remoção de SST, turbidez, cor aparente e pH do drenado e sobrenadante dos diferentes tipos de configuração de ensaios (SP, CP – cone e CP – alternativo) e geotêxteis (GTNT400, 600, 900 e GT80) avaliados nesta pesquisa.

4.4.4.1 ANÁLISE DOS SÓLIDOS TOTAIS E EFICIÊNCIA DE FILTRAÇÃO (EF)

Nas Figuras 79 e 80 tem - se os ST médios e a EF média do drenado e sobrenadante dos ensaios realizados.

Todos os resultados conferiram qualidades satisfatórias ao drenado e muito menores que a do ST inicial da mistura (20.000 mg/L) com eficiências de filtração acima de 97%.

Para os ensaios SP, os valores de ST foram maiores, apesar de ter apresentado, ainda assim, qualidade aos líquidos drenados, principalmente para o GTNT400 (Figura 79a), GTNT900 (Figura 80c) e GT80 (Figura 80d).

Para o GTNT600 (Figura 79b), houve diminuição do valor de sólidos totais para ensaios SP, porém, com a aplicação de polímeros, foram conseguidos parâmetros de ST menores nos ensaios CP – alternativo com EF maiores. Para carga hidráulica H10 obteve-se ST de 111,67 mg/L e EF de 99,41%, H30 o valor foi de 72,22 mg/L e EF de 99,66% e para H50 ST de 96,67 mg/L e EF de 99,54%.

Com cargas hidráulicas menores obteve-se piora da qualidade relacionada ao parâmetro de ST e EF para o GTNT400 (Figura 79a). O GTNT600 (Figura 79b) apresentou comportamento diferente, pois os ensaios SP apresentaram valores semelhantes de ST independente da carga hidráulica. Para carga hidráulica H10 obteve-se ST de 149,67 mg/L e EF de 99,21%, H30 o valor foi de 138,63 mg/L (o menor observado entre as cargas hidráulicas) e EF de 99,27% e para H50 ST de 145,56 mg/L e EF de 99,23%.

Minatel (2021) observou que a qualidade do drenado não teve grandes variações para ensaios sem a utilização de polímeros com GTNT300 e 600 com alturas de camada

de lodo distintas, o que também, foi observado para esta pesquisa com o GTNT600 SP (Figura 79b) com valores de ST e EF semelhantes para cargas hidráulicas diferentes. Essa observação pode ser um indício da influência que o pré-filtro tem sobre o desaguamento, onde drenagens com a mesma TAS, conseqüentemente, mesma espessura da torta, obtiveram valores muito próximos para os parâmetros de qualidade dos drenados.

Com o GTNT400 (Figura 79a) conforme houve o aumento da carga hidráulica (H30 e principalmente H50) ocorreu a melhora da qualidade do drenado referente ao ST e da EF. Foi observada exceção para o ensaio GTNT400 CP – alternativo (Figura 79a) onde houve piora da qualidade e EF com a H30 em comparação a carga hidráulica H10. Já, a carga hidráulica H50 apresentou valor menor de ST (133,33 mg/L) e EF de 99,37%. Para todos ensaios utilizando o GTNT600 SP e CP (Figura 79b) foram observados comportamentos diferentes. Para o GTNT900 SP, CP- cone e CP – alternativo (Figura 80c) a carga hidráulica H30 obteve maior valor de ST em comparação a H10, sendo o maior valor de ST encontrado para todas as configurações de ensaios com este geotêxtil. Para o GT80 SP e CP- cone (Figura 80d) os resultados seguiram a lógica de quanto maior a carga hidráulica, melhor a qualidade do drenado e EF, com exceção do ensaio CP- alternativo com valor de ST maior (258,89 mg/L) para a carga hidráulica H30.

A qualidade do drenado melhorou conforme aumentou-se a carga hidráulica, pois têm-se uma quantidade maior de sólidos, fazendo com que ocorresse o pré- filtro, que influenciou diretamente na qualidade da água, aumentando a resistência da passagem do líquido, diminuindo o volume drenado.

Os sobrenadantes dos ensaios utilizando o GTNT400 e 900 SP H50 apresentaram valores semelhantes ao de ST do drenado (Figura 79a e Figura 80c). Para o GTNT400 SP H50 o valor de ST do drenado foi de 165,56 mg/L, já, o do sobrenadante foi de 141,25 mg/L. O valor do drenado foi maior que o do sobrenadante pois para o GTNT400 a abertura de filtração é maior, assim, passou partículas de diferentes tamanhos. Em relação ao sobrenadante, o valor foi menor porque provavelmente houve o efeito da sedimentação das partículas de lodo. Para o GTNT900 SP H50 o valor de ST encontrado foi de 140,00 mg/L (menor do que observado para o GTNT400) pois a abertura de filtração do geotêxtil de massa por unidade de área maior (900 g/m²) é menor retendo maior quantidade de partículas de diversos tamanhos e melhorando a qualidade do drenado. Já, o valor de ST do sobrenadante para o GTNT900 foi de 103,33 mg/L.

Com o GTNT400 (Figura 79a) os menores valores de ST foram com o ensaio CP – cone para todas as cargas hidráulicas e conforme verificou-se o aumento da carga hidráulica houve a diminuição do ST com aumento da EF. O maior valor de ST encontrado (ST = 484,44 mg/L) foi com o ensaio H10 SP comparado com os outros ensaios CP – cone e alternativo e também para todos os outros tipos e geotêxteis analisados.

O GTNT900 (Figura 80c) obteve maior valor de ST (333,33 mg/L) com o ensaios CP – cone H30 com EF menor. Os melhores resultados foram com o CP – alternativo para todas as cargas hidráulicas, com valores de ST menores e EF maiores. Comparando os ensaios SP e CP - cone, foram obtidos melhores valores do drenado para ensaios SP. Neste caso, conforme, foi observado, para ensaios CP, nas análises de porcentagem removida, houve um aumento da remoção para cargas hidráulicas maiores (H50). Em relação ao ST houve melhora da qualidade e EF para ensaios CP- alternativo para todas as cargas hidráulicas. Porém, para as cargas hidráulicas (H30 e H50) não foram notadas diferenças no valor de ST e EF com a aplicação dos dois métodos.

Para o GT80 (Figura 80d) o maior valor de ST (306,67 mg/L) foi para o ensaio SP H10. Os menores valores de ST e conseqüentemente maiores EF foram com o ensaio CP – cone.

O maior valor de ST encontrado entre todos os ensaios e conseqüentemente menor EF foi para o ensaio GTNT400 SP H10 com ST de 484,44 mg/L e EF de 97,58%, uma EF alta, o restante foram acima de 98% de EF. Em contrapartida, os menores valores de ST encontrados e maiores EF foram para os ensaio CP- cone GTNT400 H50 com ST de 47,78 mg/L e EF de 99,86% seguido do ensaio CP – alternativo GTNT600 H30 com ST de 72,22 mg/L e EF de 99,66%.

Para os ensaios SP, apesar do GTNT400 e 900 apresentarem maiores taxas de remoção com cargas hidráulicas menores, a qualidade relacionada com o parâmetro ST apresentaram comportamento inverso, com maiores valores de ST e menores EF. Ou seja, apesar de remover mais, neste caso, não melhorou a qualidade.

Já, o efeito do polímero para os ensaios CP – cone e CP – alternativo melhoraram a qualidade, diminuindo os parâmetros de ST e aumentando a EF, principalmente para carga hidráulica H50 que apresentou melhores resultados para os ensaios CP- alternativo.

O GTNT900 SP H10 obteve melhor qualidade e remoção com maior EF, semelhante ao observado para a carga hidráulica H50.

Em relação ao GT80 SP maiores cargas hidráulicas apresentaram maiores remoções e melhor qualidade. Para H50 e H30 foram obtidas melhores qualidades para esses parâmetros com ST da ordem de 160 mg/L e EF de 99,16%.

A inserção de polímeros, além de diminuir o tempo de drenagem e consequentemente a taxa de de desaguamento promoveu melhora da qualidade do drenado para todos os geotêxteis analisados, exceto para o GTNT600 com valores de ST e EF satisfatórios para os ensaios SP.

Para ensaio CP – cone as taxas de remoção foram maiores para cargas hidráulicas maiores, o que também ocorreu para a qualidade. Para o geotêxtil tecido GT80 as cargas hidráulicas H30 e H50 obtiveram valores semelhantes de ST com 193,33 mg/L para H30 e 196,67 mg/L para H50 com maiores EF.

Os ensaios SP e CP – cone apresentaram comportamento inverso pois para os ensaios SP quanto maior a carga hidráulica menor a remoção e maior o tempo, assim, a melhora da qualidade com EF maiores foram para cargas hidráulicas maiores. Concluindo que a aplicação do polímero pode ser essencial com cargas hidráulicas maiores, obtendo melhora da qualidade.

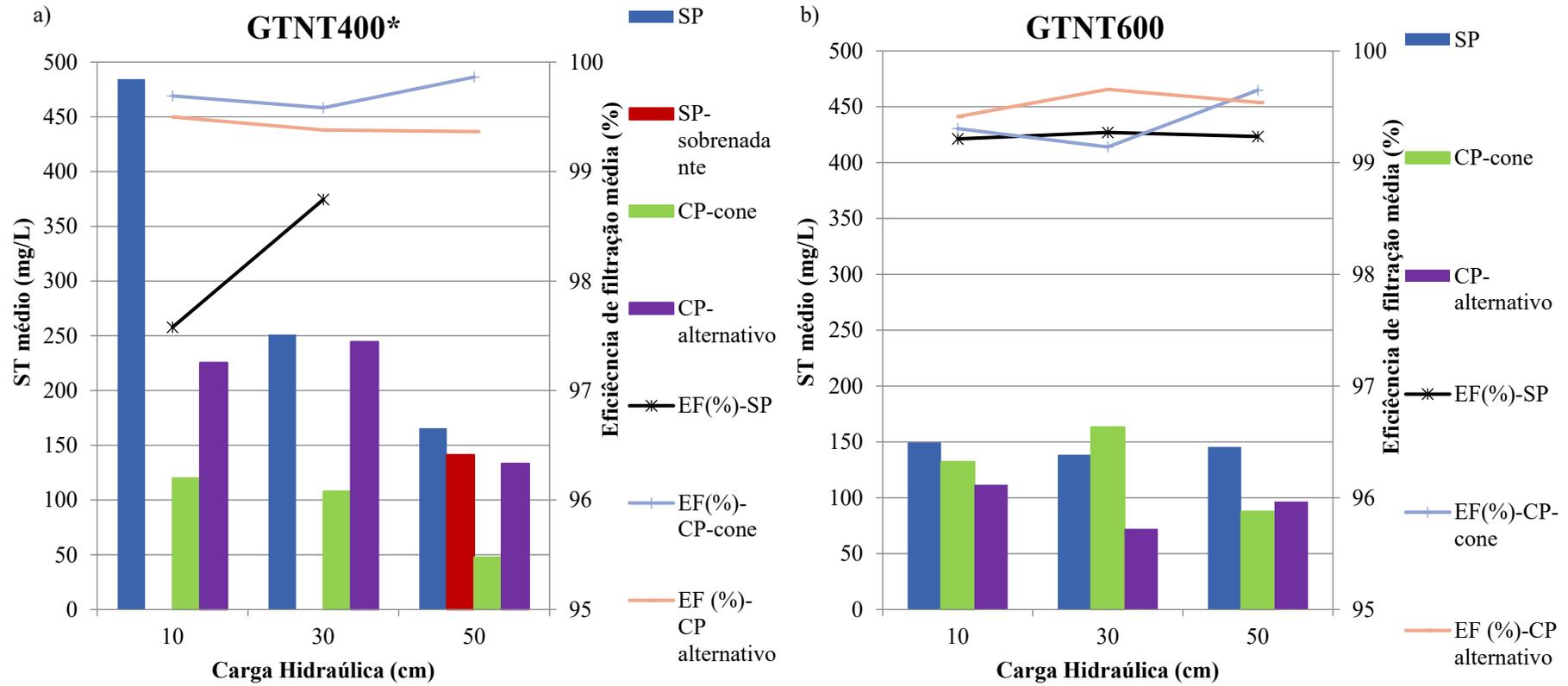
Comparando os ensaios CP – cone e CP – alternativo a melhor qualidade foi para o ensaio CP – cone para o GTNT400. Com o GTNT600 não houve diferença na aplicação, porém, aumentou-se a qualidade para os ensaios CP – alternativo. Para o GTNT900 melhor qualidade com o ensaio CP - alternativo. Por fim o GT80 SP e CP-cone seguiram a lógica de quanto maior a carga hidráulica, melhor a qualidade do drenado e EF, com exceção do ensaio CP- alternativo.

Em relação a vazão, foram observadas taxas de vazões iniciais maiores e tempo de desaguamento melhores com ensaios CP – cone e que, também, apresentaram melhora da qualidade do parâmetro de ST e EF para todas as cargas hidráulicas estudadas.

Para o GTNT600 (Figura 79b), a vazão inicial maior foi com o ensaio CP - alternativo H50 com menor valor de ST (96,67 mg/L) e EF de 99,54% com melhor qualidade comparada a outras cargas hidráulicas e tipos de ensaios. Esses dados mostraram que existe uma interação entre a utilização de polímeros com o aumento da vazão, ou seja, melhora das taxas de desaguamento e ,também, melhora da qualidade de ST e EF.

Na Tabela 56 observa-se um resumo dos valores de ST médio do drenado e sobrenadante e a Eficiência de filtração média dos ensaios SP, CP – cone e CP - alternativo dos geotêxteis estudados.

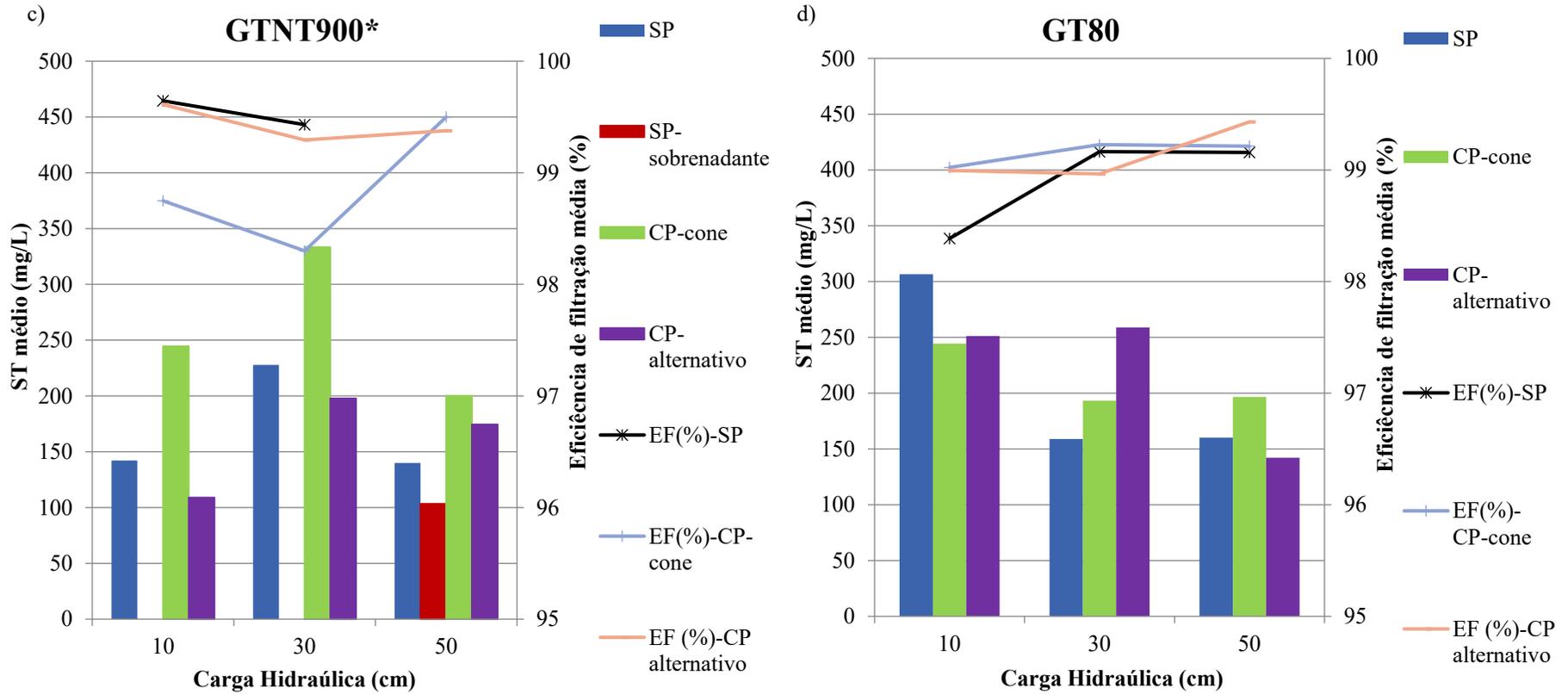
Figura 79 - ST médio do drenado e sobrenadante e EF média a) GTNT400 e b) GTNT600



Fonte: autora

*Para os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm foram calculados o ST médio do material sobrenadante (mg/L)

Figura 80 - ST médio do drenado e sobrenadante e EF média c) GTNT900 e d) GT80



Fonte: autora.

*Para os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm foram calculados o ST médio do material sobrenadante (mg/L)

Tabela 56 - ST médio do drenado, sobrenadante para os ensaios SP, CP-cone e CP- alternativo e Eficiência de filtração média (%) : GTNT400, GTNT600, GTNT900 e GT80

Geotêxtil	SP			CP-cone			CP-alternativo		
	<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>		
	<i>ST médio (mg/L)</i>			<i>ST médio (mg/L)</i>			<i>ST médio (mg/L)</i>		
	<i>ST sobrenadante médio (mg/L)</i>			<i>ST sobrenadante médio (mg/L)</i>			<i>ST sobrenadante médio (mg/L)</i>		
	<i>EF média (%)</i>			<i>EF média (%)</i>			<i>EF média (%)</i>		
<u>GTNT400</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	484,44	251,11	165,56	120,00	107,82	47,78	225,56	244,44	133,33
	-	-	141,25	-	-	-	-	-	-
	97,58	98,75	-	99,69	99,58	99,86	99,50	99,38	99,37
<u>GTNT600</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	149,67	138,63	145,56	133,22	163,33	87,78	111,67	72,22	96,67
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	99,21	99,27	99,23	99,30	99,14	99,65	99,41	99,66	99,54
<u>GTNT900</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	142,22	227,78	140,00	244,44	333,33	200,00	108,89	197,78	174,44
	-	-	103,33	-	-	-	-	-	-
	99,64	99,43	-	98,75	98,30	99,50	99,61	99,29	99,38
<u>GT80</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	306,67	158,89	160,11	244,44	193,33	196,67	251,11	258,89	142,22
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	98,39	99,16	99,16	99,02	99,23	99,21	99,00	98,96	99,43

Fonte: autora.

4.4.4.2 ANÁLISE DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO TOTAIS, SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS E EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO TOTAIS (E_{SST})

A grande maioria dos estudos com LD (Minatel, 2021; Silveira, 2012 e Barroso, 2007) avaliaram apenas os parâmetros indiretos de qualidade dos drenados (cor, turbidez e pH). De forma a complementar essas análises, para esta pesquisa, foram avaliados os sólidos em suspensão totais (SST), os sólidos dissolvidos totais (SDT) e a eficiência de remoção de SST dos drenados e sobrenadantes dos ensaios de LD.

Nas Figuras 81 a 84 temos os SST e SDT médios do drenado e sobrenadante e a eficiência de remoção de SST média dos ensaios realizados por tipo de configuração de ensaio (SP, CP- cone e CP-alternativo) e geotêxtil (GTNT400, 600, 900 e GT80).

Os níveis de sólidos em suspensão (SST) são associados à turbidez, ou seja, conferem turbidez as amostras, já, as concentrações de sólidos dissolvidos são associadas à cor, ou seja, conferem cor as amostras. Assim, o aumento da concentração de sólidos em suspensão aumenta a turbidez da amostra e de sólidos dissolvidos a cor.

Em relação aos SST, os maiores valores encontrados foram para o GTNT400 para os ensaios SP H10 (Figura 81) com valor de 185 mg/L e CP – alternativo H10 (Figura 81) no valor de 110 mg/L de SST. Para as outras cargas hidráulicas dos ensaios SP H10 e H30 foram encontrados valores baixos de SST (45 mg/L para H30 e 100 mg/L para H50), assim como para as outras cargas hidráulicas dos ensaios CP – alternativo e mesmo geotêxtil analisado. Os ensaios CP – cone e CP – alternativo foram mais eficientes na remoção deste parâmetro com valores abaixo dos encontrados para os ensaios SP, com SST mínimo de 20 mg/L e SST máximo de 76,67 mg/L.

O GTNT 600 H10 SP (Figura 82) também apresentou valor maior (ST = 123,33 mg/L), todos os outros SST medidos ficaram abaixo de 46,67 mg/L para todos os tipos de configuração de ensaio, ou seja, SP e CP (cone e alternativo).

Em contrapartida o GTNT900 (Figura 83) apresentou valores de SST menores que 43,33 mg/L para todos os tipos de ensaios e cargas hidráulicas.

Por fim, para o GT80 (Figura 84) os maiores valores de SST medidos ficaram para a carga hidráulica H10. O ensaio SP apresentou 166,67 mg/L e o CP – alternativo 116,67 mg/L de SST.

Destaca - se que os valores de SST descritos foram bem menores comparando-se com a amostra inicial, principalmente para o GTNT900. Neste caso, além da formação

de pré – filtro consolidado, a abertura de filtração deste geotêxtil ($< 0,074$ mm, que é a menor abertura de filtração observada em comparação aos outros geotêxteis analisados) provavelmente influenciou na diminuição da quantidade de sólidos em suspensão que passaram por este geotêxtil, retendo partículas de diversos tamanhos, ou seja, as partículas maiores depositadas sobre o geotêxtil, impediram as menores de passarem, fazendo com que a retenção de sólidos fosse maior, diminuindo o SST do drenado.

Ainda assim, todos os geotêxteis analisados mostraram grande eficiência do sistema de LD na remoção de sólidos suspensos. Os maiores valores de sólidos encontrados foram para a carga hidráulica H10 e isso está intimamente ligado a formação do pré – filtro que provavelmente não se consolidou no tempo de drenagem destes ensaios, que apesar de TAS menores apresentaram, também, tempo de ensaio menores.

Segundo estudos feitos por Moo-Young *et al.*,(2002), a quantidade de sólidos em suspensão durante a filtração ou TSS (total suspended solids) é alta no início do processo, mas diminui sensivelmente assim que se forma o pré –filtro. Para esta pesquisa, o pré – filtro consolidado aumentou a remoção de sólidos para cargas hidráulicas maiores, diminuindo consideravelmente os valores de SST no drenado, o que também ocorreu para cargas hidráulicas menores em menor intensidade (valores maiores de SST medidos).

Em relação ao sobrenadante, para o ensaio GTNT400 SP H50 não foi realizada a medição por razão de um problema com a quantidade de material coletado. Já, para o GTNT900 SP H50 (Figura 85) o valor do drenado (SST = 30 mg/L) foi semelhante ao observado para o sobrenadante. (SST = 26,67 mg/L).

Para os sólidos dissolvidos totais (SDT) resultado da diferença entre ST e SST, os maiores valores encontrados foram para o GTNT400 nos ensaios SP H10 e H30 (Figura 83) e CP – alternativo H30, com valores de SDT mínimo de 139,44 mg/L e valor máximo medido de 299,41 mg/L.

Para o GTNT600 (Figura 82) o maior valor foi para a carga hidráulica H30 com 153,33 mg/L de SDT.

O GTNT900 (Figura 83) aumentou consideravelmente os SDT para a maioria dos ensaios e cargas hidráulicas, com valor de SDT máximo de 313,33 mg/L para a carga hidráulica H30 do ensaio CP – cone. Em contrapartida para o GT80 (Figura 84) os valores de SDT medidos ficaram abaixo de 200 mg/L.

Em relação ao sobrenadante, para o ensaio GTNT400 SP H50 (Figura 81) o drenado apresentou valor menor (SDT = 65,56 mg/L) comparado ao sobrenadante (SDT =

141,25 mg/L), por conta do efeito do pré- filtro sobre o sistema, fazendo com que diminuísse a quantidade de sólidos dissolvidos no drenado. Já, para o GTNT900 SP H50 (Figura 83) o valor do drenado (SST = 110 mg/L) foi semelhante ao observado para o sobrenadante. (SST = 76,66 mg/L).

Podemos concluir que para o SST, houve diminuição deste parâmetro para os ensaios CP em detrimento aos ensaios SP, ou seja, a adição de polímeros conseguiu remover uma grande quantidade de sólidos deste sistema, melhorando a qualidade do drenado.

Os melhores resultados de SST, ou seja, menores valores foram observados para os ensaios CP – cone para todas as cargas hidráulicas, apesar dos ensaios CP – alternativo também apresentarem valores satisfatórios e semelhantes aos dos ensaios CP – cone.

Para cargas hidráulicas maiores os valores de SST foram semelhantes para os ensaios SP, CP – cone e CP – alternativo aumentando a remoção e diminuindo o valor de SST do drenado, porém com polímeros a qualidade foi consideravelmente maior.

Com a utilização do GTNT900 todos os SST medidos foram consideravelmente menores independente do tipo de ensaio (SP e CP). Porém, foram observadas maiores remoções de SST para os ensaios CP – cone, o que também ocorreu para o GT80.

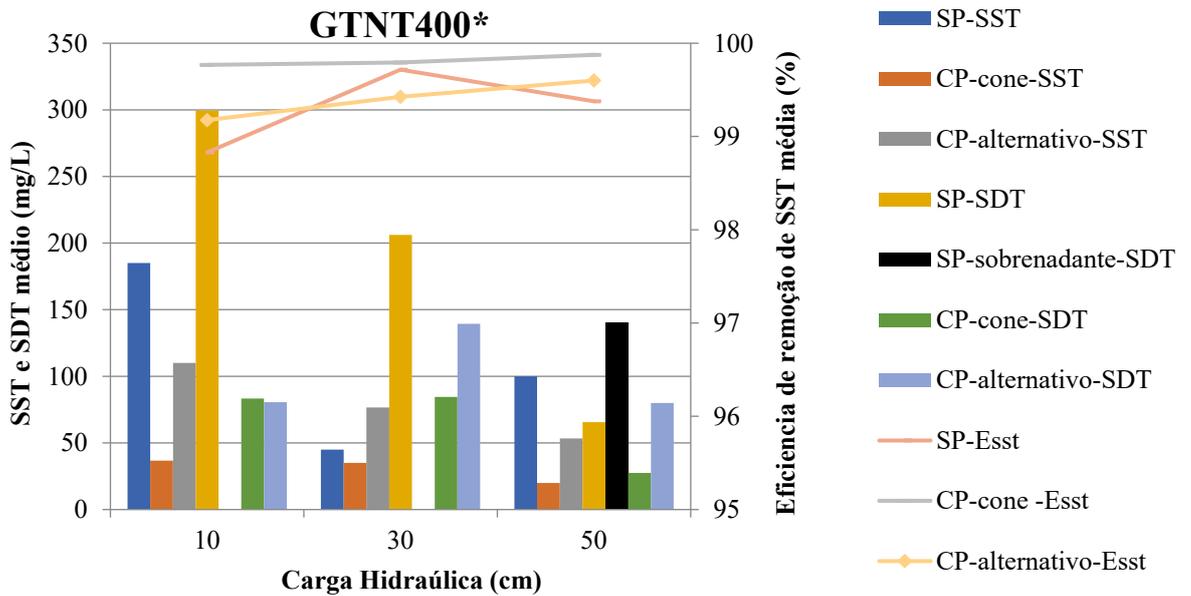
Já, em relação ao SDT houve diminuição considerável deste parâmetro com os ensaios CP para todos os geotêxteis, por conta da separação sólido/ líquido ocorrer mais facilmente. Exceto para o GT80 com menores valores de SDT nos ensaios SP. O GTNT600 e 900 apresentaram menores valores de SDT nos ensaios CP – alternativo e o GTNT400 nos ensaios CP – cone.

Ao ser calculada a eficiência de remoção de SST, foram obtidos valores altos de remoção, ou seja, acima de 96%. Maiores cargas hidráulicas apresentaram maiores eficiências de remoção de sólidos suspensos totais independente do tipo de ensaio (com valores acima de 98%).

Em relação ao enquadramento, de acordo com a Resolução Conama 357/05, o valor máximo de SDT para águas doces classes I, II e III para lançamento de efluentes é de 500 mg/L, assim, todos os valores dos drenados ficaram abaixo do estipulado pela Resolução.

Na Tabela 57 foram apresentados o SST e SDT médio do drenado e sobrenadante e a Eficácia de remoção de SST (%) para todos os tipos de configuração de ensaio e geotêxteis.

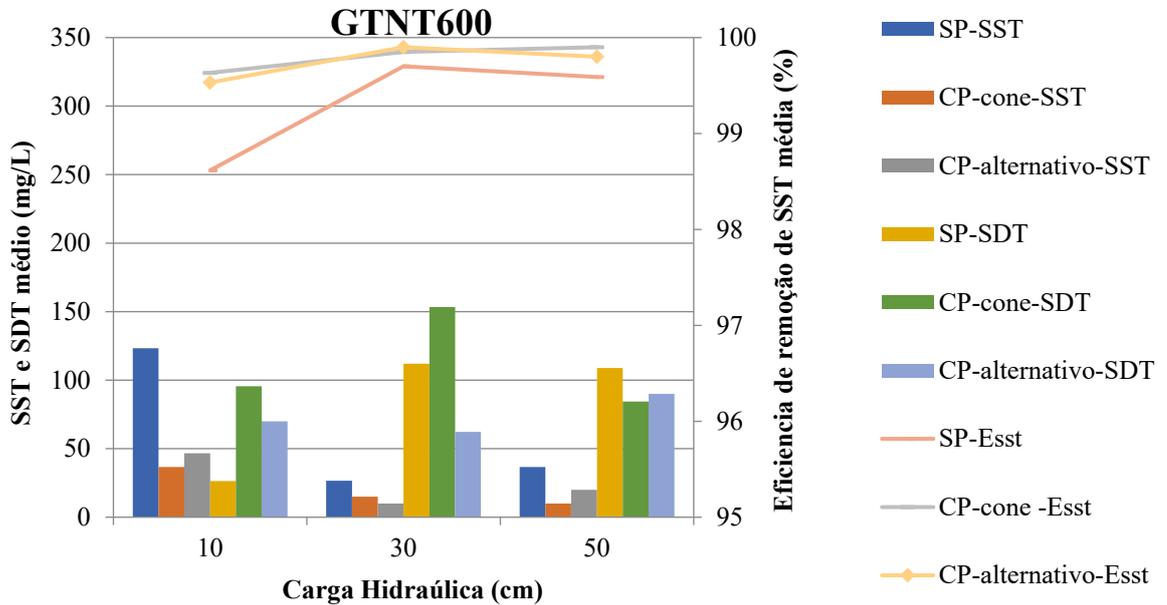
Figura 81 - SST e SDT médio e Eficiência de remoção de SST média (%) para drenado e sobrenadante –GTNT400



Fonte: autora

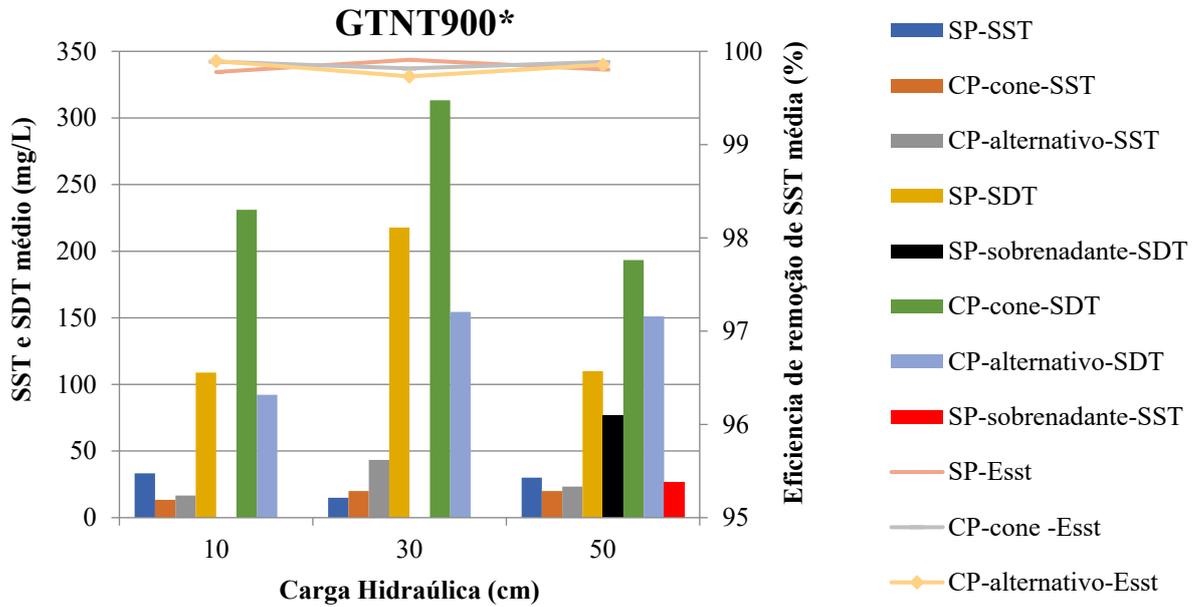
*Para os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm foram calculados o SST e SDT (mg/l) do material sobrenadante

Figura 82- SST e SDT médio e Eficiência de remoção de SST média (%) para drenado–GTNT600



Fonte: autora.

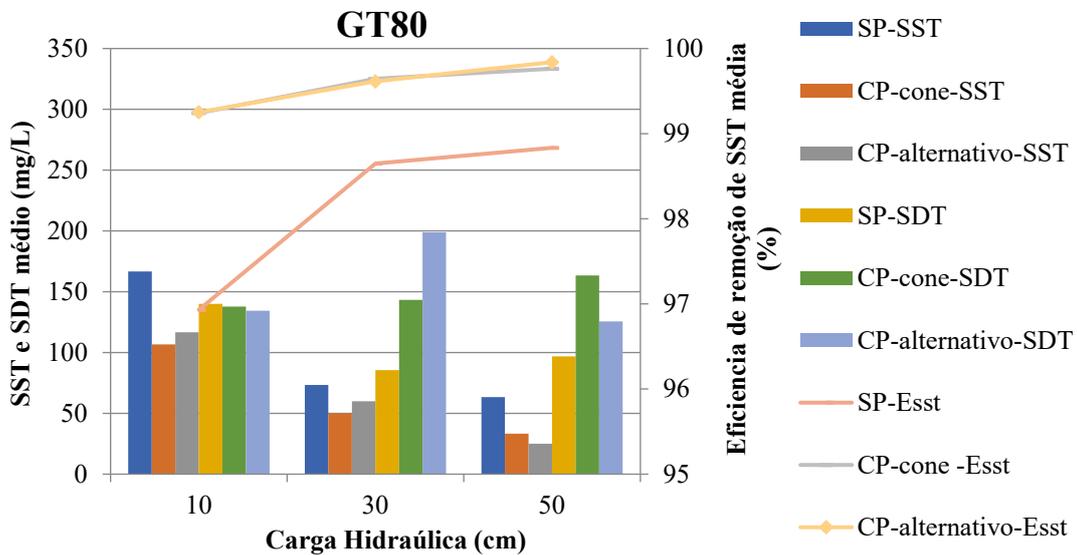
Figura 83 - SST e SDT médio e Eficiência de remoção de SST média (%) para drenado e sobrenadante –GTNT900



Fonte: autora.

*Para os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm foram calculados o SST e SDT (mg/l) do material sobrenadante

Figura 84 -SST e SDT médio e Eficiência de remoção de SST média (%) para drenado –GT80



Fonte: autora

Tabela 57 - SST e SDT médio do drenado, sobrenadante para os ensaios SP, CP-cone e CP- alternativo e Eficiência de remoção de SST (%) : GTNT400, GTNT600, GTNT900 e GT80

Geotêxtil	SP			CP-cone			CP-alternativo		
	<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>		
	<i>SST médio (mg/L)</i>			<i>SST médio (mg/L)</i>			<i>SST médio (mg/L)</i>		
	<i>SDT médio (mg/L)</i>			<i>SDT médio (mg/L)</i>			<i>SDT médio (mg/L)</i>		
	<i>Sobrenadante SST médio (mg/L)</i>			<i>Sobrenadante SST médio (mg/L)</i>			<i>Sobrenadante SST médio (mg/L)</i>		
	<i>Sobrenadante SDT médio (mg/L)</i>			<i>Sobrenadante SDT médio (mg/L)</i>			<i>Sobrenadante SDT médio (mg/L)</i>		
	<i>Esst média (%)</i>			<i>Esst média (%)</i>			<i>Esst média (%)</i>		
<u><i>GTNT400</i></u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	185,00	45,00	100,00	36,67	35,00	20,00	110,00	76,67	53,33
	299,44	206,11	65,56	83,33	84,49	27,48	80,56	139,44	80,00
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	141,25	-	-	-	-	-	-
	98,83	99,72	99,39	99,77	99,79	99,88	99,18	99,43	99,60
<u><i>GTNT600</i></u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	123,33	26,67	36,67	36,67	15,00	10,00	46,67	10,00	20,00
	26,34	111,96	108,89	95,55	153,33	84,45	70,00	62,22	90,00
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	98,62	99,70	99,59	99,63	99,85	99,90	99,53	99,90	99,80
<u><i>GTNT900</i></u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	33,33	15,00	30,00	13,33	20,00	20,00	16,67	43,33	23,33
	108,89	217,78	110,00	231,11	313,33	193,33	92,22	154,45	151,11
	-	-	26,67	-	-	-	-	-	-

	-	-	76,66	-	-	-	-	-	-
	99,78	99,91	99,81	99,89	99,82	99,89	99,90	99,73	99,86
<u>GT80</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	166,67	73,33	63,33	106,67	50,00	33,33	116,67	60,00	25,00
	140,00	85,56	96,78	137,77	143,33	163,36	134,44	198,89	125,55
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	96,93	98,65	98,83	99,24	99,64	99,76	99,25	99,62	99,84

Fonte: autora.

4.4.4.3 Análise da Turbidez

Na Figura 85 podemos observar a turbidez média do drenado e sobrenadante dos ensaios realizados.

Em relação a turbidez foi verificado o que foi descrito no item anterior, ou seja, o aumento de SST aumentou, também, os valores de turbidez para os líquidos drenados.

O GTNT400 (Figura 85a) no ensaio SP H10 apresentou valor de turbidez de 385 NTU o maior observado entre todos os tipos de ensaios e geotêxteis. No ensaio CP – alternativo H10 o valor de turbidez foi de 193 NTU.

Com o GTNT600 H10 SP (Figura 85b) o valor foi de 152,33 NTU. Para o GTNT 900 (Figura 85c) os valores de turbidez foram baixos para todos os tipos de ensaios (SP e CP) independente da carga hidráulica. O valor mínimo de turbidez medida (8,05 NTU) foi para o ensaio CP – cone H10, já, o valor máximo de turbidez encontrada foi de 31,05 NTU para o ensaio CP – alternativo H30. Para o GT80 (Figura 85d) no ensaio SP H 10 foi observado o segundo maior valor de turbidez medido (237,17 NTU) e para o ensaio CP – alternativo H10 a turbidez foi de 132 NTU.

Os melhores resultados foram encontrados nos ensaios CP (cone e alternativo) com diminuição da turbidez e melhora da qualidade dos drenados, principalmente para cargas hidráulicas maiores (H50), conforme ocorreu, também, com os outros parâmetros analisados. Além disso os ensaios com o GTNT400 H10, GTNT600 H10 e GT80 H10 que apresentaram maiores valores de turbidez nos ensaios SP, com a adição de polímeros diminuíram consideravelmente a turbidez dos drenados.

Os melhores valores de turbidez foram para o GTNT400, GTNT900 e GT80 com os ensaios CP – cone. Para o GTNT600 os melhores resultados foram com os ensaios CP – alternativo.

Comparando o drenado ao sobrenadante nos ensaios GTNT400 e 900 SP H50 (Figura 85a e 85c), o GTNT400 apresentou valor de drenado de 66,83 NTU e sobrenadante de 157,80 NTU. Com o GTNT900 o valor foi de 26,60 NTU para o drenado e 32,53 NTU para o sobrenadante. Para ambos geotêxteis os valores dos drenados foram menores do que o do sobrenadante, por conta da formação do pré – filtro, pela sedimentação das partículas do lodo sobre o geotêxtil que conferiram melhor qualidade aos drenados.

Foi verificado para esta pesquisa, conforme já observado por Minatel (2021), Santos (2012), Silveira (2012) e Reis (2011), uma tendência de decréscimo nos valores

do parâmetros cor aparente e turbidez do drenado ao longo do processo de desaguamento por LD.

O decréscimo destes parâmetros podem estar associados com a estabilização da torta formada pela sedimentação dos sólidos do lodo sobre o geotêxtil, o que indica que há uma ação de auto filtração das partículas de lodo sedimentadas.

Barroso (2007) indica que na auto filtração, a ação de filtro não se restringi apenas ao geotêxtil, mas propaga-se para a camada adjacente, formando uma espécie de pré-filtro, em que as partículas retidas adjacentes às aberturas do geotêxtil tendem a redistribuir as tensões verticais devido à força de percolação e força da gravidade, e podem formar arcos que dificultam a passagem de partículas com diâmetros menores que as aberturas dos geotêxteis.

De acordo com Silveira (2012) no item 2.5.1 foram descritos os padrões de enquadramento dos drenados para a turbidez utilizados em seus estudos. Esses parâmetros também foram utilizados por Minatel (2021) nos seus ensaios SP. Resumidamente Silveira (2012) dividiu os drenados em duas condições de enquadramento (condição I e II) e uma condição de reaproveitamento (condição III).

A condição I continham os drenados com turbidez < 40 NTU e possibilidade de enquadramento da água drenada em corpos de água doce classe I (Resolução Conama 357/05); a condição II- drenados com valores de turbidez < 100 NTU e possibilidade de enquadramento da água drenada em corpos de água doce Classe II (Resolução Conama 357/05) e a condição III – drenados com valores de turbidez < 10 NTU, com possibilidade de reaproveitamento da água drenada dentro da própria ETA.

Aplicando as condições de enquadramento propostas por Silveira (2012) para este ensaios SP e CP, temos:

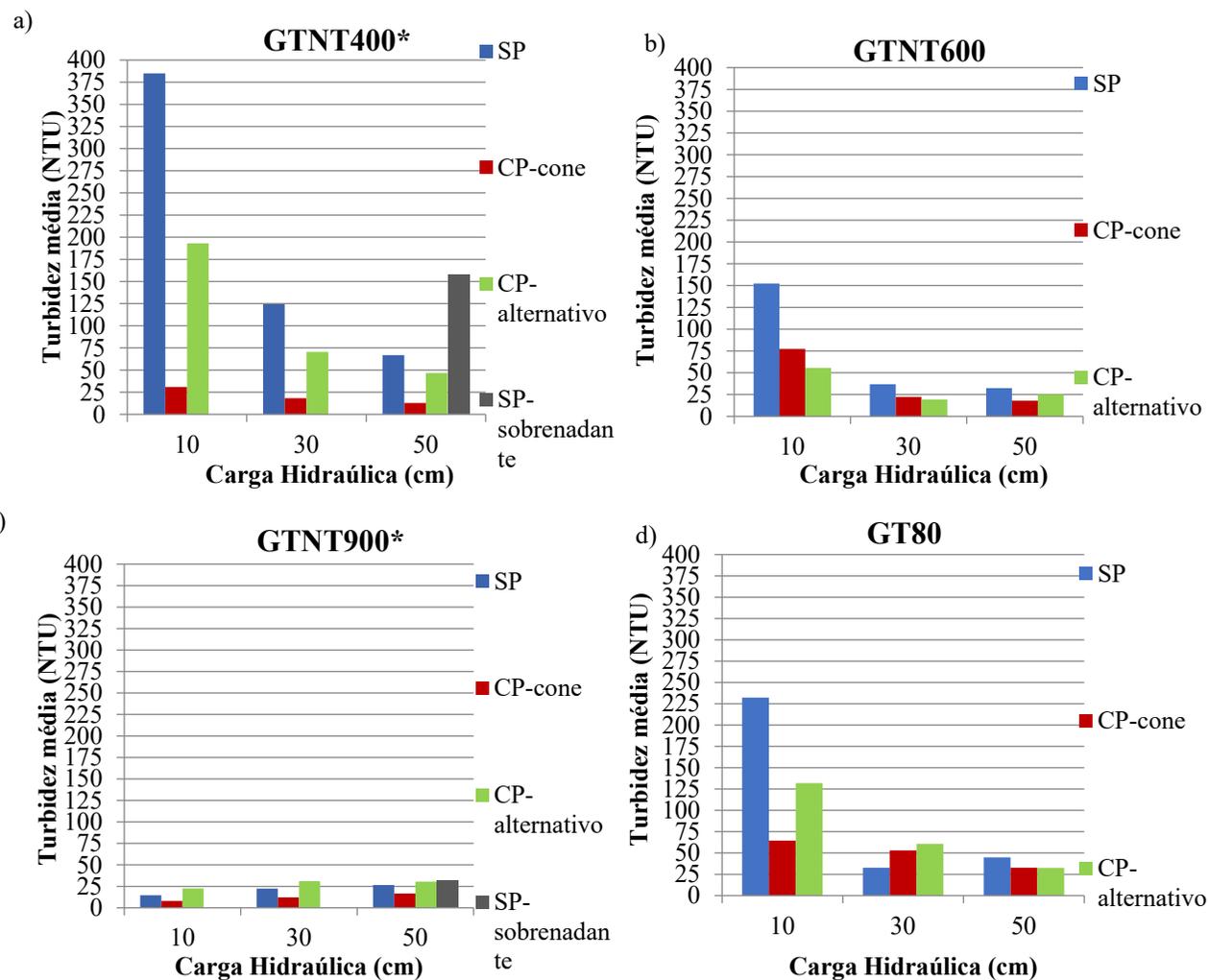
- Condição I – GTNT400 CP – cone para todas as cargas hidráulicas; GTNT600 SP, CP – cone e CP – alternativo para cargas hidráulicas H30 e H50; GTNT900 SP para todas as cargas hidráulicas e sobrenadante H50; GTNT900 CP – cone para H30 e H50; GTNT900 CP – alternativo para todas as cargas hidráulicas; GT80 SP H30 e H50 e GT80 CP – cone e alternativo para carga hidráulica H50.
- Condição II – GTNT400 SP H50; GTNT400 CP – alternativo H30 e H50; GTNT600 CP – cone e alternativo H10; GT80 SP H50; GT80 CP –cone H10 e H30 e GT80 CP – alternativo H30.
- Condição III –GTNT900 CP – cone H10.

Conforme observado a maioria dos ensaios realizados SP e CP apresentaram turbidez da amostra final correspondente à Condição I com valores < 40 NTU e possibilidade de enquadramento da água drenada em corpos de água doce classe I, de acordo com a Resolução Conama 357/05. Minatel (2021) encontrou valores diferentes nos seus ensaios SP, onde verificou que a partir de 30 minutos todo o drenado dos LD de carga hidráulica H10, H40 e H50 cm puderam ser enquadrado na categoria III.

Assim como descreveu Minatel (2021) foram observados valores elevados de turbidez e cor aparente nos ensaios com menor altura de camada de lodo. Tal observação pode ser resultado da formação de um pré filtro instável, que é resultado da sedimentação de partículas presentes no lodo, aliado à baixa compressibilidade da camada de lodo nestes ensaios.

Na Tabela 58 tem-se um resumo dos resultados do parâmetro de turbidez média do drenado e sobrenadante dos ensaios realizados.

Figura 85 - Turbidez média do drenado e sobrenadante a) GTNT400; b) GTNT600; c) GTNT900 e d) GT80



Fonte: autora.

*Para os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm foram calculados o ST médio do material sobrenadante (mg/L)

Tabela 58 - Turbidez média do drenado e sobrenadante para os ensaios SP, CP- cone e CP- alternativo: GTNT400, GTNT600, GTNT900 e GT80

Geotêxtil	SP			CP-cone			CP-alternativo		
	<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>		
	<i>Turbidez média (NTU)</i>			<i>Turbidez média (NTU)</i>			<i>Turbidez média (NTU)</i>		
	<i>Turbidez sobrenadante média (NTU)</i>			<i>Turbidez sobrenadante média (NTU)</i>			<i>Turbidez sobrenadante média (NTU)</i>		
<u>GTNT400</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	385,00	124,40	66,83	31,00	18,23	12,75	193,00	70,57	46,58
	-	-	157,80	-	-	-	-	-	-
<u>GTNT600</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	152,33	36,67	32,30	77,37	22,25	17,93	55,60	19,33	25,17
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<u>GTNT900</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	14,70	22,40	26,60	8,05	12,10	16,61	22,63	31,05	30,57
	-	-	32,53	-	-	-	-	-	-
<u>GT80</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	232,17	32,63	44,90	64,57	52,93	32,63	132,00	60,83	32,47
	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: autora.

4.4.4.4 Análise da Cor Aparente

Na Figura 86 podemos observar a cor aparente média do drenado e sobrenadante dos ensaios realizados.

Conforme foi apresentado no item 4.4.4.2 referente à série de sólidos realizada (SST e SDT) foram identificados os ensaios que apresentaram valores elevados de sólidos dissolvidos na amostra final e neste tópico foram avaliados a cor aparente destes ensaios, resultando, também em valores altos. Confirmando que a presença de SDT conferiram cor as amostras analisadas.

Com o GTNT400, no ensaio SP H10 (Figura 86a) a cor aparente não conseguiu ser mensurada, pois provavelmente estava acima do valor máximo medido pelo aparelho. Para a carga hidráulica H30 (Figura 86a) o valor da cor aparente foi de 354 mg Pt/L. No ensaio CP – alternativo H30 (Figura 86a) obteve-se valor de 326,67 mg Pt/L para o mesmo geotêxtil.

Em relação ao GTNT600 (Figura 86b) o maior valor de SDT encontrado foi para o ensaio CP – cone H30 com resultado de 153,33 mg/L, em contrapartida, o valor de cor aparente (85 mg Pt/L) foi o menor comparando-se os resultados das cores referentes a outras cargas hidráulicas e tipo de configuração de ensaio realizado, ou seja, SP e CP – alternativo para este geotêxtil. Essa observação mostrou um comportamento diferente para o GTNT600, onde provavelmente houve uma interação entre polímero, propriedades do geotêxtil e lodo que conferiram melhor qualidade (relacionada ao parâmetro da cor aparente) apesar da amostra conter SDT.

O GTNT900 SP H30 (Figura 86c) apresentou cor aparente de 137,33 mg Pt/L, já , com a utilização de polímeros no ensaio CP – cone (Figura 86c) a cor aparente conseguiu ser reduzida, com valores de até 55 mg Pt/L para cargas hidráulicas H10 e H30, já para H50 o valor de cor mais que duplicou sendo encontrado 141 mg Pt/L. Para este geotêxtil não- tecido também existe uma interação entre polímero, geotêxtil e lodo que conferiram melhor qualidade relacionada à cor apesar de apresentar valores de SDT de até 313,33 mg/L para a carga hidráulica H30 no ensaio CP – cone. Porém, isso não foi identificado para os ensaios CP – alternativo H30 e H50 (Figura 86c) com valores de cor aparente semelhantes. Para a carga hidráulica H30 o valor foi de 276,33 mg Pt/L e para a H50 foi de 277,67 mg Pt/L com valores de SDT encontrados, também, semelhantes, de 154,45 mg/L para H30 e 151,11 mg/L para carga hidráulica H50.

Evidencia-se que o valor de SDT encontrados com o GTNT900 nos ensaios CP – alternativo H30 e H50 (Figura 86c) foram semelhantes ao encontrado no ensaio GTNT600 CP – cone (Figura 86b), porém, o GTNT600 apresentou comportamento diferente conferindo melhor qualidade ao drenado com cor aparente de 85 mg Pt/L.

Já, no ensaio GTNT900 CP – cone (Figura 86c) os SDT encontrados para todas as cargas hidráulicas ficaram acima de 193 mg/L apresentando cor aparente reduzida no valor máximo de 55 mg/L, mostrando, também, eficiência na remoção da cor para ensaios CP, apesar da existência de SDT nas amostras.

Para o geotêxtil tecido GT80 (Figura 86d) os valores de cor aparente foram os mais elevados dentre os ensaios. Para o ensaio SP H10 foi encontrado valor de 342 mg Pt/L. Já, utilizando polímeros os valores foram maiores para carga hidráulica H10 no ensaio CP – cone (408,33 mg Pt/L) e CP – alternativo (486 mg Pt/L) se comparado com a mesma carga hidráulica para ensaios SP. Para as cargas hidráulicas H30 e H50 foram encontrados valores semelhantes de cor para os ensaios CP. Para a carga hidráulica H30 no ensaio CP – cone (Figura 86d) o valor foi de 297,67 mg Pt/L e para o ensaio alternativo (Figura 86d) 300,33 mg Pt/L. Para H50 os valores foram menores com 183,67 mg Pt/L para o ensaio CP – cone (Figura 86d) e 207 mg Pt/L para o ensaio alternativo (Figura 86d).

Ou seja para o GT80 foram observados valores de SDT abaixo de 200 mg/L, e, neste caso, conferiram cor as amostras. Esse comportamento, também, foi identificado por Minatel (2021) nos seus ensaios SP utilizando geotêxtil tecido, onde estes geotêxteis promoveram drenados com valores elevados de cor aparente. Para este estudo, isso ocorreu independente da aplicação dos polímeros, ou seja, neste caso a aplicação de polímeros não conferiu melhor qualidade ao drenado relacionada à este parâmetro.

Comparando o drenado ao sobrenadante nos ensaios GTNT400 e 900 SP H50 (Figura 86a e 86c), o GTNT400 apresentou valor de drenado de 263 mg Pt/L e sobrenadante de 306,67 mg Pt/L. Com o GTNT900 o valor foi de 185,67 mg Pt/L para o drenado e 237,33 mg Pt/L para o sobrenadante. Para ambos geotêxteis os valores dos drenados foram menores do que o do sobrenadante, por conta da formação do pré – filtro, pela sedimentação das partículas do lodo sobre o geotêxtil que conferiram melhor qualidade aos drenados.

Comparando os resultados de cor aparente dos ensaios SP e CP foram observados que os valores melhoram para os ensaios CP para os geotêxteis não – tecidos (GTNT400, 600e 900) e pioraram para o geotêxtil tecido (GT80).

Com o geotêxtil tecido (GT80) os resultados de cor aparente foram menores para os ensaios SP para cargas hidráulicas H10 e H30. Para a H50 foram obtidos valores de cor aparente um pouco menores com ensaios CP.

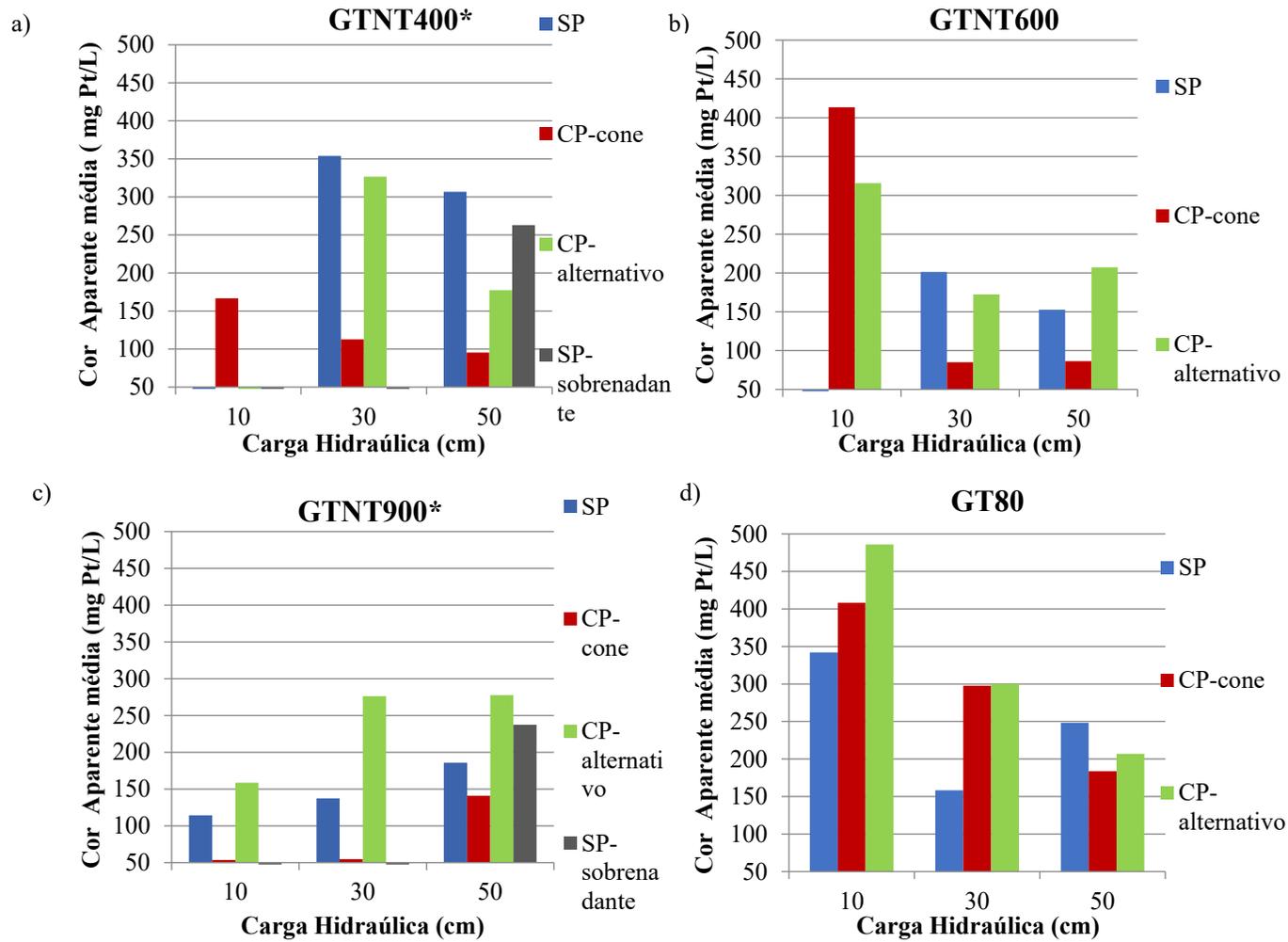
Comparando os resultados dos ensaios CP – cone e CP – alternativo foram obtidos melhores resultados com o ensaio CP – cone para o GTNT400, 600 e 900.

Comprova-se o que foi observado no item 4.4.4.3 sobre o decréscimo dos parâmetros de cor e turbidez nos ensaios de desaguamento SP e CP, por conta da estabilização da torta formada pela sedimentação dos sólidos do lodo sobre o geotêxtil, onde observou-se uma ação de auto filtração das partículas de lodo sedimentadas, conforme explica Barroso (2007).

Houve a formação de pré – filtro instável para menores cargas hidráulicas que conferiram valores elevados de turbidez e cor aparente para os ensaios.

Na Tabela 59 foram apresentados os resultados do parâmetro cor aparente média do drenado e sobrenadante dos ensaios realizados.

Figura 86 - Cor aparente média do drenado e sobrenadante a) GTNT400; b) GTNT600; c) GTNT900 e d) GT80



Fonte: autora.

*Para os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm foram calculados o ST médio do material sobrenadante (mg/L)

Tabela 59 - Cor aparente do drenado e sobrenadante para os ensaios SP, CP- cone e CP- alternativo: GTNT400; GTNT600, GTNT900 e GT80

Geotêxtil	SP			CP-cone			CP-alternativo		
	<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>		
	<i>Cor aparente média (mg Pt/L)</i>			<i>Cor aparente média (mg Pt/L)</i>			<i>Cor aparente média (mg Pt/L)</i>		
	<i>Cor aparente sobrenadante média (mg Pt/L)</i>			<i>Cor aparente sobrenadante média (mg Pt/L)</i>			<i>Cor aparente sobrenadante média (mg Pt/L)</i>		
<u>GTNT400</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	-	354,00	263,00	166,67	112,67	95,33	-	326,67	177,33
	-	-	306,67	-	-	-	-	-	-
<u>GTNT600</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	-	201,33	152,67	413,33	85,00	86,33	315,67	172,33	207,33
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<u>GTNT900</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	114,33	137,33	185,67	53,67	54,67	141,00	158,67	276,33	277,67
	-	-	237,33	-	-	-	-	-	-
<u>GT80</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	342,00	158,33	248,33	408,33	297,67	183,67	486,00	300,33	207,00
	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: autora

4.4.4.5 Análise do pH

Na Figura 87 podemos observar o pH médio do drenado e sobrenadante dos ensaios realizados.

O pH do lodo bruto medido foi de 6,88 e o pH médio da mistura na concentração de 2% foi de 7,20.

Destaca-se na Figura 87 que os valores de pH encontrados nos drenados ficaram acima de 7, exceto para o ensaio GTNT400 CP – alternativo H10 (Figura 87a) com menor valor de pH observado (6,90), cor aparente não foi mensurada por estar acima do valor máximo medido pelo aparelho e turbidez de 193,00 NTU. Já, o valor máximo de pH (8,12) foi para o ensaio GTNT900 CP – cone H50 (Figura 87c) com turbidez de 16,61 NTU e cor aparente de 141,00 mg Pt/L.

Para os ensaios SP houve aumento do pH para todos os geotêxteis ensaiados, exceto para o ensaio GTNT600 SP H10 (Figura 87b), onde foi observada diminuição deste parâmetro com valor de 7,03. Barroso (2007) nos seus ensaios SP observou elevações nos valores de pH para lodo de sulfato de alumínio, ainda assim, destacou, que para alguns ensaios houve a diminuição do pH com aumento dos parâmetros de cor e turbidez, o que também foi observado nesta pesquisa para este ensaio, já que o parâmetro cor não conseguiu ser mensurado por estar acima do valor máximo medido pelo aparelho, por sua vez, a turbidez encontrada foi de 152,33 NTU.

Minatel (2021) também descreveu que na maioria dos ensaios SP (25 ensaios dos 67 analisados) com % ST iguais ou superiores a 1,5% houve uma tendência de elevação nos valores de pH no líquido drenado. Além disso, alguns ensaios utilizando geotêxtil tecido 55/55UV e % ST=1,0% apresentaram diminuição deste parâmetro com o aumento da cor e turbidez.

Para esta pesquisa, uma possível justificativa deve-se ao fato do lodo coletado antes da diluição possuir pH de 6,88, e, durante o processo de drenagem, foi observada grande diminuição dos parâmetros de cor e turbidez que são característicos da separação da parte líquida da parte sólida do lodo. Esses sólidos podem estar dissolvidos (SDT) ou em suspensão (SST), sendo responsáveis pela diminuição do pH do lodo, ficando estes sólidos retidos no leito de drenagem.

Para a maioria dos ensaios CP (CP- cone e alternativo) foram observados aumento do pH em comparação ao valor da mistura inicial, exceto para os ensaios GTNT600 CP – cone (Figura 87b) e GT80 CP – cone (Figura 87d) para todas as

cargas hidráulicas. Com o GTNT600 H10, o pH foi de 7,02 e para as cargas hidráulicas H30 e H50 foram obtidos valores semelhantes (7,24), apresentando pouca variação neste caso. Isso mostra conforme os outros parâmetros já avaliados e a análise estatística realizada que não há diferença na aplicação ou não de polímeros para este geotêxtil, já, que também, não foi observada diferença de valores neste parâmetro. Com o GT80 o pH foi de 7,10 para a carga hidráulica H10, 7,13 para a H30 e 7,28 para a carga hidráulica H50.

O GTNT600 CP – alternativo (Figura 87b) também apresentou diminuição deste parâmetro para as cargas hidráulicas H10 e H30 (7,14) e pouca variação para H50 (7,23), assim como o GTNT900 CP – alternativo (Figura 87c) sendo observado aumento dos parâmetros de cor e turbidez. Em contrapartida, para o GT80 CP – alternativo (Figura 87d) foram observados aumento do pH para todas as cargas hidráulicas.

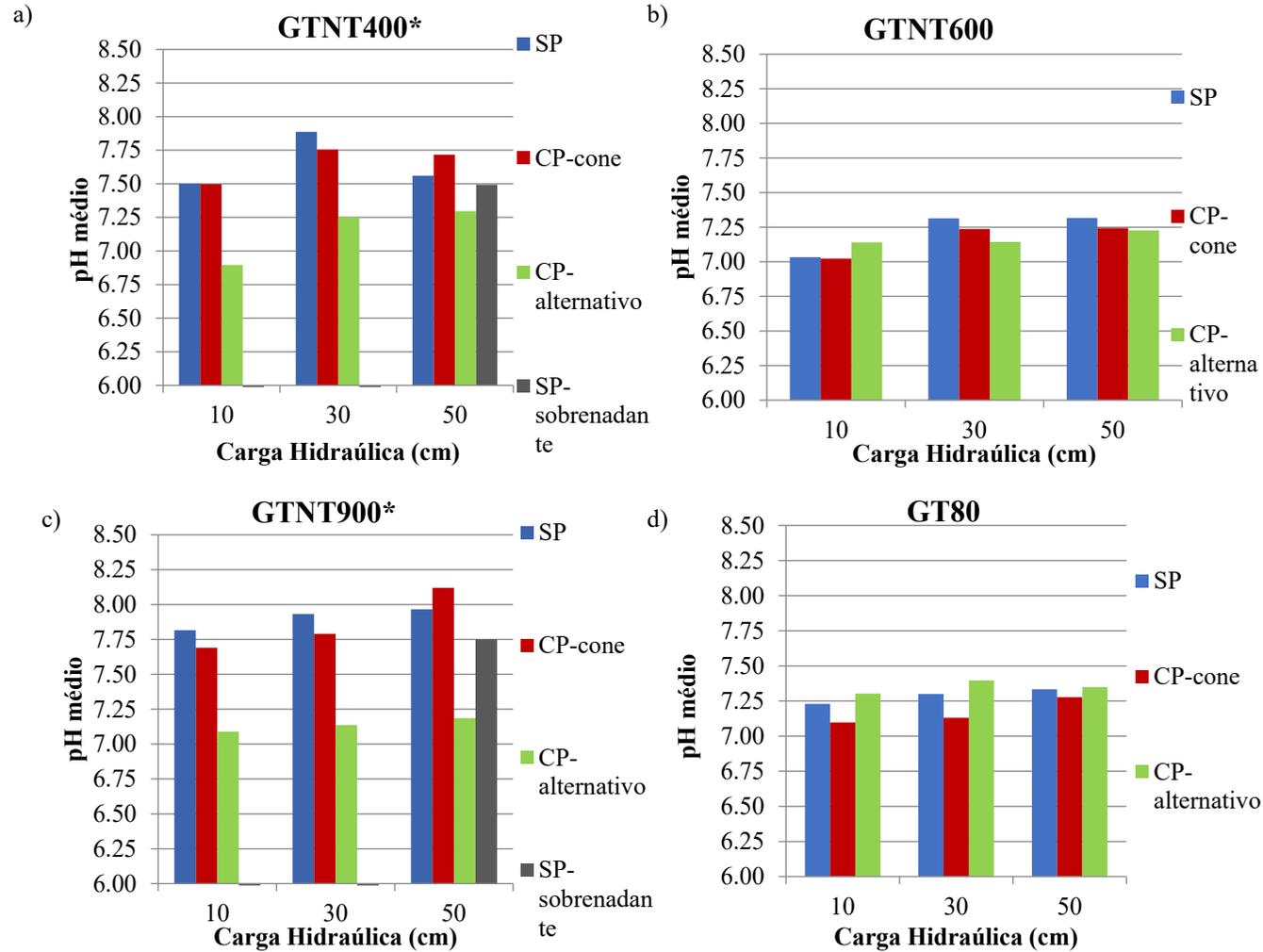
A diminuição de pH nestes ensaios aumentou os parâmetros de cor e turbidez para ensaios SP e CP, conforme foram observados por Minatel (2021) e Barroso (2007) nos seus ensaios SP.

O sobrenadante coletado nos ensaios GTNT400 e 900 SP H50 (Figura 87a e 87c) apresentaram valores semelhantes de drenado e sobrenadante. O GTNT400 obteve pH de 7,56 para o drenado e 7,49 para o sobrenadante. O GTNT900 obteve pH maiores no valor de 7,97 para o drenado e 7,75 para o sobrenadante.

Em relação ao enquadramento deste parâmetro, de acordo com a Resolução Conama 357/05, para lançamento de efluentes a faixa de pH máximo é de 5 a 9. Neste caso, todos os valores atenderam o parâmetro observado.

Na Tabela 60 foram apresentados os valores de pH médio dos drenados e sobrenadantes dos ensaios.

Figura 87 – pH médio do drenado e sobrenadante a) GTNT400; b) GTNT600; c) GTNT900 e d) GT80



Fonte: autora.

*Para os ensaios GTNT400- SP e GTNT900-SP h=50 cm foram calculados o ST médio do material sobrenadante (mg/L)

Tabela 60 – pH médio do drenado e sobrenadante para os ensaios SP, CP- cone e CP- alternativo: GTNT400; GTNT600, GTNT900 e GT80

Geotêxtil	SP			CP-cone			CP-alternativo		
	<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>			<i>H (cm)</i>		
	<i>pH médio</i>			<i>pH médio</i>			<i>pH médio</i>		
	<i>pH sobrenadante médio</i>			<i>pH sobrenadante médio</i>			<i>pH sobrenadante médio</i>		
<u>GTNT400</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	7,50	7,89	7,56	7,50	7,75	7,72	6,90	7,25	7,30
	-	-	7,49	-	-	-	-	-	-
<u>GTNT600</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	7,03	7,31	7,32	7,02	7,24	7,24	7,14	7,14	7,23
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<u>GTNT900</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	7,82	7,93	7,97	7,69	7,79	8,12	7,09	7,14	7,19
	-	-	7,75	-	-	-	-	-	-
<u>GT80</u>	10	30	50	10	30	50	10	30	50
	7,23	7,30	7,33	7,10	7,13	7,28	7,30	7,40	7,35
	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: autora

4.5 Análise estatística dos ensaios: SP, CP-cone e CP- alternativo

Na Tabela 61 foram apresentados os valores de cada M_R seca (g) referentes aos ensaios realizados. Eles foram organizados por tipo de geotêxtil (GTNT – não tecido ou GT – tecido); massa por unidade de área (400, 900, 80, 600 g/m²); triplicatas realizadas (1, 2 ou 3); cargas hidráulicas (H10, H30 ou H50) e ao tipo de ensaio (SP, CP- cone ou CP –alternativo. A M_R seca média (g) calculada foi referente à triplicata dos ensaios efetuados. Os valores de M_R seca média foram utilizados para esta análise estatística e suas discussões constam nos subtópicos seguintes.

Tabela 61- Massa retida e massa retida média seca dos ensaios realizados: SP, CP- cone e CP- alternativo referentes ao GTNT400, GTNT600, GTNT900 e GT80.

GTNT400 SP	M _R seca (g)	M _R seca média (g)	GTNT400 CP-cone	M _R seca (g)	M _R seca média (g)	GTNT 400 CP-alternativo	M _R seca (g)	M _R seca média (g)
<i>1H10</i>	42,79	47,42	<i>1H10</i>	75,52	75,13	<i>1H10</i>	89,60	93,03
<i>2H10</i>	46,50		<i>2H10</i>	77,90		<i>2H10</i>	98,45	
<i>3H10</i>	52,95		<i>3H10</i>	71,94		<i>3H10</i>	91,02	
<i>1H30</i>	115,73	114,21	<i>1H30</i>	148,10	138,42	<i>1H30</i>	282,30	184,74
<i>2H30</i>	125,42		<i>2H30</i>	133,73		<i>2H30</i>	132,52	
<i>3H30</i>	101,49		<i>3H30</i>	133,44		<i>3H30</i>	139,39	
<i>1H50</i>	0	0	<i>1H50</i>	256,10	303,52	<i>1H50</i>	169,44	178,76
<i>2H50</i>	0		<i>2H50</i>	328,61		<i>2H50</i>	187,04	
<i>3H50</i>	0		<i>3H50</i>	325,86		<i>3H50</i>	180,09	
GTNT900 SP	M _R seca (g)	M _R seca média (g)	GTNT900 CP-cone	M _R seca (g)	M _R seca média (g)	GTNT 900 CP-alternativo	M _R seca (g)	M _R seca média (g)
<i>1H10</i>	74,55	85,84	<i>1H10</i>	41,89	36,15	<i>1H10</i>	52,23	50,29
<i>2H10</i>	101,57		<i>2H10</i>	39,63		<i>2H10</i>	39,74	
<i>3H10</i>	81,40		<i>3H10</i>	26,93		<i>3H10</i>	58,89	
<i>1H30</i>	253,00	214,14	<i>1H30</i>	17,64	69,74	<i>1H30</i>	153,39	165,14
<i>2H30</i>	160,96		<i>2H30</i>	75,76		<i>2H30</i>	163,15	
<i>3H30</i>	228,46		<i>3H30</i>	115,81		<i>3H30</i>	178,87	
<i>1H50</i>	0	0	<i>1H50</i>	324,23	338,09	<i>1H50</i>	187,45	243,98
<i>2H50</i>	0		<i>2H50</i>	362,71		<i>2H50</i>	373,06	
<i>3H50</i>	0		<i>3H50</i>	327,33		<i>3H50</i>	171,40	

GT80 SP	M_R seca (g)	M_R seca média (g)	GT80 CP-cone	M_R seca (g)	M_R seca média (g)	GT80 CP-alternativo	M_R seca (g)	M_R seca média (g)
<i>1H10</i>	16,89	15,80	<i>1H10</i>	40,59	43,95	<i>1H10</i>	52,90	53,88
<i>2H10</i>	15,57		<i>2H10</i>	45,49		<i>2H10</i>	59,02	
<i>3H10</i>	14,92		<i>3H10</i>	45,78		<i>3H10</i>	49,71	
<i>1H30</i>	86,80	59,62	<i>1H30</i>	111,51	126,45	<i>1H30</i>	141,60	138,12
<i>2H30</i>	45,17		<i>2H30</i>	125,65		<i>2H30</i>	132,49	
<i>3H30</i>	46,87		<i>3H30</i>	142,18		<i>3H30</i>	140,25	
<i>1H50</i>	58,81	66,48	<i>1H50</i>	238,97	234,91	<i>1H50</i>	158,47	188,98
<i>2H50</i>	70,08		<i>2H50</i>	234,16		<i>2H50</i>	212,68	
<i>3H50</i>	70,54		<i>3H50</i>	231,60		<i>3H50</i>	195,78	
GTNT600 SP	M_R seca (g)	M_R seca média (g)	GTNT600 CP-cone	M_R seca (g)	M_R seca média (g)	GTNT 600 CP-alternativo	M_R seca (g)	M_R seca média (g)
<i>1H10</i>	57,65	39,29	<i>1H10</i>	38,08	38,40	<i>1H10</i>	35,46	39,14
<i>2H10</i>	37,10		<i>2H10</i>	39,51		<i>2H10</i>	41,31	
<i>3H10</i>	23,11		<i>3H10</i>	37,60		<i>3H10</i>	40,64	
<i>1H30</i>	181,96	101,61	<i>1H30</i>	106,49	104,30	<i>1H30</i>	67,17	126,47
<i>2H30</i>	99,75		<i>2H30</i>	89,59		<i>2H30</i>	149,31	
<i>3H30</i>	23,11		<i>3H30</i>	116,80		<i>3H30</i>	162,91	
<i>1H50</i>	178,33	157,09	<i>1H50</i>	195,08	230,75	<i>1H50</i>	168,47	182,81
<i>2H50</i>	131,54		<i>2H50</i>	311,82		<i>2H50</i>	193,77	
<i>3H50</i>	161,38		<i>3H50</i>	185,35		<i>3H50</i>	186,16	

Fonte: autora.

4.5.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS TIPOS DE GEOTÊXTEIS

Nesta análise foram considerados os resultados obtidos para as massas retidas secas na amostra de geotêxtil A, e comparadas de maneira pareada com os resultados obtidos para as massas retidas secas na amostra de geotêxtil B, ambas sem o uso de polímero. Nesse caso, o conjunto de pontos pareados foi $n=9$. Segundo Triola (2017) o valor crítico de T para o teste de postos com sinais de *Wilcoxon* é $T_{crit}=8$, considerando nível de confiança de 95%.

A Tabela 62 apresenta os resultados de estatística de teste (T), obtidos considerando as massas retidas secas nos quatro geotêxteis analisados, independentemente da carga hidráulica aplicada.

Tabela 62- Resultados da estatística de teste (T) considerando as massas retidas secas dos quatro GTs analisados independentemente da carga hidráulica aplicada

		Amostra B			
		GTNT400	GTNT900	GT80	GTNT600
Amostra A	GTNT400		T=0< T_{crit} =8 Rejeitar H_0	T=0< T_{crit} =8 Rejeitar H_0	T=7< T_{crit} =8 Rejeitar H_0
	GTNT900			T=0< T_{crit} =8 Rejeitar H_0	T=0< T_{crit} =8 Rejeitar H_0
	GT80				T=3< T_{crit} =8 Rejeitar H_0

Nota: Nível de confiança = 95%

Fonte:autora.

Ao avaliar os resultados obtidos e apresentados na Tabela 68, observou-se que para todos os casos analisados obteve-se a estatística de teste (T) menor que o valor crítico de T para o teste de postos com sinais de *Wilcoxon* (T_{crit}), permitindo rejeitar a hipótese nula (H_0), indicando que há 95% de assertividade ao se verificar, estatisticamente, que há diferença nas massas retidas secas ao se empregar diferentes geotêxteis.

4.5.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CARGA HIDRÁULICA APLICADA

Os ensaios foram realizados em triplicata, considerando as alturas hidráulicas H10, H30 e H50 cm.

A análise estatística considerou avaliar a diferença estatística, ou não, das massas retidas secas quando submetidas a diferentes cargas hidráulicas para um mesmo geotêxtil tendo o lodo recebido, ou não polímero.

No entanto, o teste de postos com sinais de *Wilcoxon*, considerando-se nível e confiança de 95%, requer um número mínimo de 5 amostras, ou seja, as amostras deveriam ser realizadas em quintuplicatas.

Dessa maneira, estabeleceu-se para esta análise o nível de confiança de 85%, com nível de significância (α) de 15%.

A Tabela 63 apresenta valores de *p-valor* para o teste de postos com sinais de *Wilcoxon*.

Tabela 63 - Valores de *p-valor* para o teste de postos com sinais de *Wilcoxon*

Geotêxtil	Carga Hidráulica (cm)	Sem polímero			Com polímero		
		10	30	50	10	30	50
GTNT400	10		0,125<0,150 Rejeitar H ₀	-		0,125<0,150 Rejeitar H ₀	0,125<0,150 Rejeitar H ₀
	30			-			0,125<0,150 Rejeitar H ₀
GTNT900	10		0,125<0,150 Rejeitar H ₀	-		0,250>0,150 Não rejeitar H ₀	0,125<0,150 Rejeitar H ₀
	30			-			0,125<0,150 Rejeitar H ₀
GT80	10		0,125<0,150 Rejeitar H ₀	0,125<0,150 Rejeitar H ₀		0,125<0,150 Rejeitar H ₀	0,125<0,150 Rejeitar H ₀
	30			0,625>0,150 Não rejeitar H ₀			0,125<0,150 Rejeitar H ₀
GTNT600	10		0,125<0,150 Rejeitar H ₀	0,125<0,150 Rejeitar H ₀		0,125<0,150 Rejeitar H ₀	0,125<0,150 Rejeitar H ₀
	30			0,125<0,150 Rejeitar H ₀			0,125<0,150 Rejeitar H ₀

Nota: Nível de confiança: 85%

Fonte: autora

Os dados da massa retida seca para a carga hidráulica H50 cm, aplicados nos geotêxteis GTNT400 e GTNT900 para ensaios sem polímeros não foram utilizados pois ao final do período pré-estabelecido para o ensaio, não havia 40% do volume de lodo a ser drenado.

Ao se analisar as amostras de lodo sem polímeros, observou-se que na maioria dos casos, o p-valor obtido para o teste de postos com sinais de *Wilcoxon* foi inferior ao nível de significância (α) de 15%, permitindo rejeitar a hipótese nula (H_0), exceto ao se comparar o volume de sólidos retidos com carregamento hidráulico de 30 cm e 50 cm que resultou em *p-valor* $r = 0,625$, superior ao nível de significância estabelecido, não permitindo, assim, a rejeição da hipótese nula (H_0).

Embora localmente não se tenha rejeitado a hipótese nula ao testar o geotêxtil GT80, vale mencionar que não se observou variação da massa retida seca quando a carga hidráulica variou de 30 cm para 50 cm, porém observou-se variação significativa ao se comparar o carregamento hidráulico de 10 cm com os demais carregamentos, indicando que globalmente houve variação estatisticamente significativa nas massas retidas secas com a variação do carregamento hidráulico.

Ao se analisar as amostras de lodo com polímeros, observou-se, na maioria dos casos, que o p-valor obtido para o teste de postos com sinais de *Wilcoxon* foi inferior ao nível de significância (α) de 15%, permitindo rejeitar a hipótese nula (H_0). No entanto, ao observar o carregamento hidráulico de 10 cm com o carregamento hidráulico de 30 cm para o geotêxtil GTNT900, o p-valor obtido para o teste de postos com sinais de *Wilcoxon* foi superior ao nível de significância (α) de 15%, não sendo possível rejeitar a hipótese nula (H_0).

Embora localmente não se tenha rejeitado a hipótese nula ao testar o geotêxtil GTNT900 com polímero, vale mencionar que não se observou variação da massa retida seca quando a carga hidráulica variou de 10 cm para 30 cm, porém observou-se variação significativa ao se comparar o carregamento hidráulico de 30 cm com o carregamento hidráulico de 50 cm, indicando que globalmente houve variação estatisticamente significativa nas massas retidas secas com a variação do carregamento hidráulico.

Assim, independentemente do geotêxtil analisado e da presença ou não de polímero no lodo, observou-se, de maneira estatisticamente significativa e com nível de confiança de 85%, que a massa de lodos seca retida variou significativamente em função da carga hidráulica empregada.

4.5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TIPO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO POLÍMERO (CONE/ALTERNATIVO)

Com o objetivo de analisar possíveis discrepâncias entre os métodos empregados para a escolha do polímero, bem como sua dosagem, analisou-se os resultados das massas retidas secas obtidas por cada método empregando-se o teste de *Wilcoxon* pareado, considerando nível de confiança de 85% e nível de significância (α) de 15%.

A Tabela 64 apresenta valores de *p-valor* para o teste de postos com sinais de *Wilcoxon*.

Tabela 64 - *p*-valor obtidos para o teste pareado de postos com sinais de *Wilcoxon*, aplicado ao experimento com polímero escolhido pelo método do cone e pelo método alternativo, considerando nível de confiança de 85%

		Amostra B (Alternativo)												
		GTNT400			GTNT900			GT80			GTNT600			
		H (cm)	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50
Amostra A (Cone)	GTNT400	10	0,125 Rejeitar H_0											
		30		0,250 Não Rejeitar H_0										
		50			0,125 Rejeitar H_0									
	GTNT900	10				0,125 Rejeitar H_0								
		30					0,125 Rejeitar H_0							
		50						0,250 Não Rejeitar H_0						
	GT80	10							0,125 Rejeitar H_0					
		30								0,125 Rejeitar H_0				
		50									0,125 Rejeitar H_0			
	GTNT600	10										0,375 Não Rejeitar H_0		

		30												0,250 Não Rejeitar H_0	
		50													0,250 Não Rejeitar H_0

Nota: Nível de confiança = 85%

Fonte: autora

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 70, observa-se que 41,67% dos dados resultaram em $p - valor > \alpha = 0,150$, indicando a não rejeição da hipótese nula (H_0); já os 58,33% dos dados resultaram em $-valor < \alpha = 0,150$, indicando a rejeição da hipótese nula (H_0).

Para o geotêxtil GTNT600, independentemente da carga hidráulica aplicada, o método aplicado para seleção do polímero, não indicou diferença estatística significativa para a massa retida seca; já para o geotêxtil GT80, o método aplicado para a seleção do polímero indicou diferença significativa ao se avaliar a massa retida seca. Já os geotêxteis GTNT400 e GTNT900 apresentaram diferença estatística significativa para as massas retidas secas em função do método de seleção de polímero adotado, exceto para as cargas $H=30$ cm e 50 cm, respectivamente.

Apesar de se trabalhar com nível de confiança de 85% na análise dos dados apresentados, parece haver uma interação entre o método aplicado e o tipo de geotêxtil empregado.

4.5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA O EMPREGO DE POLÍMERO NO LODO

A fim de avaliar a influência da aplicação do polímero ao lodo, em relação a massa retida seca procedeu-se a análise estatística empregando-se o teste de *Wilcoxon* pareado, considerando nível de confiança de 95% e nível de significância (α) de 5%.

Para isso considerou-se como amostra A, os valores da massa retida seca de lodo sem a aplicação de polímero, com os da amostra B, que ora foram os resultados obtidos da massa retida seca a partir da aplicação do polímero escolhido pelo método do cone, ora com os resultados obtidos da massa retida seca a partir da aplicação do polímero escolhido pelo método alternativo. Todos os testes foram realizados de maneira pareada.

Nesse caso, o conjunto de pontos pareados foram $n=9$. Segundo Triola (2017) o valor crítico de T para o teste de postos com sinais de *Wilcoxon* é $T_{crit}=8$, considerando nível de confiança de 95%.

A Tabela 65 apresenta os valores de T e p -valor obtidos do teste de *Wilcoxon* pareado.

Tabela 65 - Valores de T e p-valor obtidos do teste de Wilcoxon pareado, considerando nível de confiança de 95%, nível de significância (α) de 5%, aplicados entre as amostras de lodo sem ou com polímero em função do geotêxtil empregado

		Amostra B (Com polímero)							
		GTNT400		GTNT900		GTNT80		GTNT600	
		Cone	Alternativo	Cone	Alternativo	Cone	Alternativo	Cone	Alternativo
Amostra A (Sem Polímero)	GTNT400	T=0<T _{crit} =8 0,001953 Rejeitar H ₀	T=0<T _{crit} =8 0,001953 Rejeitar H ₀						
	GTNT900			T=0<T _{crit} =8 0,001953 Rejeitar H ₀	T=1<T _{crit} =8 0,003906 Rejeitar H ₀				
	GTNT80					T=0<T _{crit} =8 0,001953 Rejeitar H ₀	T=0<T _{crit} =8 0,001953 Rejeitar H ₀		
	GTNT600							T=14>T _{crit} =8 0,121086 Não Rejeitar H ₀	T=14>T _{crit} =8 0,121086 Não Rejeitar H ₀

Nota: Nível de confiança = 95%

Fonte: autora

Ao avaliar os dados apresentados na Tabela 65 percebe-se que a maioria dos ensaios realizados identificaram diferença estatística em relação a massa retida seca ao empregar-se o polímero, exceto pelo ensaio realizado para o geotêxtil GTNT600, que resultou $T > T_{\text{critico}}$ indicando que não se deve rejeitar a condição de igualdade entre os resultados de massa retida com e sem o uso de polímeros.

5. Conclusões

A partir do desenvolvimento e discussão dos resultados a cerca do que foi estudado, as conclusões principais foram:

- Os geotêxteis empregados (diferentes massas por unidade de área) apresentaram diferenças estatísticas em termos da retenção de sólidos. Para o lodo sem aplicação de polímero, quanto maior a massa por unidade de área maior a massa retida;
- Existem diferenças estatísticas na massa retida seca ao se empregar diferentes geotêxteis e independentemente do geotêxtil e da presença ou não de polímeros a massa retida seca variou em função da carga hidráulica aplicada;
- Foi identificado que há diferença estatística em termos da carga hidráulica aplicada e a massa de sólido seco retido, indicando que quanto maior a carga hidráulica maior a massa retida seca;
- Na maioria dos casos analisados, o tipo de ensaio empregado (cone ou método alternativo) resultou comportamento diferente na retenção dos sólidos;
- Percebeu-se diferença estatística na massa retida seca ao se aplicar polímero ao lodo, indicando maior retenção quando aplicado o polímero. No entanto, parece haver uma interação entre as propriedades do geotêxtil e o polímero empregado;
- Para o GTNT600, recomendado por Cordeiro (2001) e utilizado na maioria dos ensaios de LD, independente da carga hidráulica aplicada, o método aplicado para seleção de polímeros não indicou diferença estatística na massa retida seca. Além disso, os parâmetros de qualidade avaliados foram semelhantes e satisfatórios para ensaios SP e CP, apesar do tempo de remoção que foi otimizado nos ensaios CP;
- Para o GT80 o método indicou diferença estatística;
- Para os GTNT400 e 900 foi observada diferença significativa para a massa retida seca em função do método aplicado, exceto para as cargas hidráulicas H30 e H50;
- Em relação à EF todos os ensaios conferiram qualidades satisfatórias ao drenado e muito menores que os sólidos totais iniciais da mistura, com $EF > 98\%$ para os ensaios CP;
- Para a E_{SST} (%) foram obtidos valores altos de remoção $> 96\%$. Maiores cargas hidráulicas obtiveram maiores eficiências de remoção de SST, independente da configuração do ensaio (SP e CP – cone e alternativo) com valores acima de 98%;

- O método alternativo para seleção de polímeros é recomendado pois removeu mais com qualidade satisfatória, ainda assim, a configuração deste ensaio é o que ocorre normalmente nos LDs, pois, nesses sistemas, o fundo é plano e a transmissividade é constante;
- Os melhores resultados observados de remoção e qualidade dos drenados foram para cargas hidráulicas maiores e conseqüentemente $TAS > 6 \text{ kg/m}^2$;
- Para todas as cargas hidráulicas dos ensaios SP quanto menor a TAS, maiores as taxas de remoção de água em tempo menor, já, para maiores cargas, com maiores TAS, taxas de remoção menores em tempo maior, exceto para GT80 SP com maior taxa de remoção e melhor qualidade para carga hidráulica H50;
- O melhor resultado foi com o ensaio alternativo com taxa de aplicação de sólidos (TAS) de 10 kg/m^2 , carga hidráulica (H) de 50 cm, geotêxtil não tecido de massa por unidade de área 900 g/m^2 (GTNT900) com o polímero aniônico denominado A110 HMW na concentração de 0, 2% e dosagem de 20ml/L , com taxa de remoção acima de 92,5% em 120 minutos (2 horas) e parâmetros de qualidade satisfatórios.

Apesar da utilização do lodo e água do decantador advindos da ETA de São Carlos, o leito de drenagem não é uma tecnologia de desaguamento adequada para esta estação, já que esse sistema é indicado para ETAs de médio e pequeno porte, ou seja, municípios menores. Em relação ao reúso desta água dentro da própria ETA, deve ser levado em conta o risco biológico, ou seja, realizar análises de qualidade da água, principalmente coliformes fecais e metais (alumínio).

Ressalta-se, ainda, que o lodo necessita passar por um adensador anteriormente a aplicação nos leitos de drenagem.

6. Sugestões de pesquisas futuras

A partir dos resultados encontrados neste trabalho com a utilização de LD em escala de bancada e a aplicação ou não de polímeros, foram sugeridas novas pesquisas em torno do tema:

- Realizar maior número de ensaios (trabalhar com quintuplicatas) para as mesmas condições analisadas (SP e CP);
- Trabalhar com maior variação de geotêxteis tecidos (principalmente) e não-tecidos;
- Trabalhar com diferentes concentrações de sólidos totais a serem aplicados nos sistemas de LD e cargas hidráulicas, em ensaios SP e CP para entender a influências das variáveis no sistema;
- Realizar análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar os diferentes geotêxteis ensaiados nos ensaios SP e CP e como as partículas estão dispostas sobre eles;
- Testar outros polímeros aniônicos e catiônicos de alto peso molecular;
- Realizar ensaios de cone em triplicata para comprovação dos resultados obtidos;
- Realizar ensaios alternativos em triplicata e possíveis desdobramentos sobre a proposição de uma nova metodologia derivada do ensaio alternativo para seleção de polímeros aplicados aos LD e comprovação da melhora da qualidade e desaguamento para ensaios CP;
- Avaliar não apenas a fase de drenagem do lodo, mas, também, a fase de secagem de lodo em LD nos ensaios SP e CP, para possíveis comparações, como: diferença no aumento no teor de sólidos totais, no tempo de secagem e na variação da TAS;
- Influência do fenômeno da transmissividade no desaguamento de lodo de ETA em LD além do fluxo normal ao plano do geotêxtil;
- Realizar ensaios com outros tipos de lodo, proveniente de outras estações, para avaliar a possível influência no tempo de drenagem e qualidade dos líquidos drenados;

- Replicar os resultados dos ensaios em escala de bancada com LD para campo, utilizando ou não polímeros, com o intuito de avaliar realmente os ganhos em qualidade e volume drenado, quando têm-se sistemas de LD implantados.

Como qualquer outro trabalho, esta pesquisa apresentou limitações, sendo realizada totalmente no período da pandemia do COVID-19, já, que por ser experimental, necessitava – se de espaço físico, equipamentos e materiais para seu desenvolvimento. Por conta da pandemia, alguns materiais demoraram um pouco a chegar. Além disso, necessitou-se, também, coletar maior quantidade de água do decantador e lodo para composição das misturas. O lodo demorou um pouco para ser coletado, pois teve-se que aguardar a limpeza dos decantadores da estação. Assim, os maiores entraves foram o tempo curto para desenvolvimento do trabalho juntamente com a pandemia.

Referências bibliográficas

ABINT. **Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos**. Curso Básico de Geotêxteis. São Paulo, 2001.

ABOY, N. **Secagem Natural e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Porto Alegre, 97 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

ACHON, C.L. & CORDEIRO, J.S. **Gerenciamento de lodo de ETAs – Remoção de água livre através de Leitos de Secagem e Lagoas**. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais. Joinville – SC, ABES, cd, I-047, 2003.

ACHON, C.L.; CORDEIRO, J.S. **Análise Crítica da Implantação de Sistemas Naturais de Remoção de volume de lodo de ETA**. In: XXIX Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (AIDIS), Anais. San Juan- Porto Rico, cd, IAchon-Brasil-1, 2004.

ACHON, C. L.; SOARES, L.V.; MEGDA, C. R. **Impactos ambientais provocados pelo lançamento In Natura de lodos provenientes de Estações de Tratamento de Água**. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, 2005.

ACHON, C. L.; Barroso, M. M.; Cordeiro, J. S. (2008) **Leito de drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água**. 2008. Artigo Técnico - Engenharia Sanitária e Ambiental vol.13 no.1 Rio de Janeiro Jan./Mar.

ACHON, C.L.; CORDEIRO, J.S. **Riscos da destinação de lodos de ETAs – Leis 9.605/1998 e 12.305/2010**. In: XVII Exposição de Experiências Municipais em Saneamento. 43º Assembléia nacional do ASSEMAE, de 19 a 24 de maio de 2013, Vitória, ES, Brasil, VII-28, 2013. 13p.

ACHON, C.L.; CORDEIRO, J.S. **Gestão de resíduos dos serviços de saneamento (água e esgoto), a lei 12.305/2010 e os desafios no Brasil**. In: XXXV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (AIDIS), 2016, Anais. Bogota, Colombia, cd, I-Achon-Brasil-1, 2016.

ALBRECHT, A.E. **Disposal of alum sludges**. Journal AWWA. Denver, v.64, n.1, jan, p. 46- 52, 1972.

ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; MÄDER NETTO, O. S. **Desidratação do lodo aeróbio e séptico através do uso de centrífuga tipo Decanter, com e sem o uso de polieletrólitos**. 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Anais... João Pessoa, 2001.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater**. 20.ed. Washington DC, USA, 2001.

APHA, AWWA & WPCF. **Standard Methods for examination of water and wastewater**. 21ª ed. New York, 2005.

ARDILA, M. A; SOUZA, S. T ; SILVA, J.F; VALENTIM C. A; DANTAS. A, D. **Geotextile Tube Dewatering Performance Assessment: An Experimental Study of Sludge Dewatering Generated at a Water Treatment Plant.** Revista Sustainability. p.1-22, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (ABNT). **NBR 12216: Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público.** São Paulo, SP, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (ABNT). **NBR 12569: Geotêxteis – Determinação da espessura.** São Paulo, SP, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12553: geossintéticos:terminologia.** São Paulo, 2003. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 10319: Geossintéticos-Ensaio de tração faixa larga.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181: Solo- Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 12956: Geotêxteis e produtos correlatos - Determinação da abertura de filtração característica.** Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOSSINTÉTICOS - IGSBR. **Recomendação 004: Aplicação de geossintéticos em áreas de disposição de resíduos,** 2014

ASTM (1991). **Standard Test Method for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity of Geotextiles and Geotextiles Related Products,** D 4491. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, 5 p.

ASTM (1991). **Standard Test Method for Measuring Nominal Thickness of Geotextiles and Geomembranes,** D 5199. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, pp. 216–218.

ASTM (1992). **Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles,** D5261. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, pp. 242–243.

ASTM D4751 (2016) **.Standard Test Methods for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile.**

ASTM D3776 (2017). **Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric.**

ASTM D4595. **Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method.** (2017).

ASTM D4884 / D4884M - 14a. **Standard Test Method for Strength of Sewn or Bonded Seams of Geotextiles**

ASTM D4355 / D4355M - 14(2018). **Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light, Moisture and Heat in a Xenon Arc-Type Apparatus.**

_____. **ASTM D 2035:** Standard Practice for Coagulation- Flocculation Jar Test of Water. West Conshohocken, PA, USA, 2019.

AVANCINI, L. L. de S. **Análise do desaguamento do lodo de estações de tratamento de água em sistemas de confinamento em geotêxtil.** 2017. 135 f. Dissertação (Mestrado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.

BALTAZAR, P. M. R. **Interfaces Solo-Geossintético em corte em Plano Inclinado.** 2008. 111 f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2008.

BARROSO, M. M. **Influência das micro e macropriedades dos lodos de estação de tratamento de água no desaguamento por leito de drenagem.** 2007. 249f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-13062007-073455/pt-br.php>>. Acesso em: 25 out. 2021.

BENJAMIM, C.V.S. **Avaliação experimental de protótipo de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil.** 293p. Tese (Doutorado). Programa de Pós- Graduação em Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2006.

BIDONE, F. R. A., CASTRO, C. M. B., ABOY, N. (1997) **Monitoramento de Parâmetros Físico/químicos de Lodos de ETAs Durante a sua Desidratação em Leitões de Secagem com Diferentes Espessuras de Leito Drenante.** In: IXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, ABES. Foz do Iguaçu – PR.

BITTON, G. **Wastewater microbiology.** New York: Wiley, 2001.

BOINA, W. L. **ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE DESAGUAMENTO DE LODOS DE ETEs EM BAG's: O CASO DA ETE-LIMOEIRO – PRESIDENTE PRUDENTE-SP.** São Carlos (2012). Dissertação de Mestrado.

BORBA, A.M.P. **Solução Ambiental para os Rejeitos da ETA Guaira/SP através de Leito de Drenagem e Sedimentador.** Semasa, São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.semasa.sp.gov.br/admin/biblioteca/docs/pdf/35Assemac033.pdf>>. Acesso em: 21 dez. 2021.

BOURGÈS-GASTAUD, S., STOLTZ, G., SIDJUI, F., TOUZE Foltz, N., 2014. **Nonwoven geotextiles to filter clayey sludge: an experimental study.** Geotext. Geomembranes 42, 214–223.

BOURGÈS-GASTAUD, S., GUILLAUME Stoltz, F. SIDJU N. Touze Foltz. **Filtration de boues argileuses par géotextiles non-tissés.** 10èmes Rencontres Géosynthétiques, Mar 2015, La Rochelle, France. 8 p. fhal-01144193f.

_____. **Lei nº 9.7633, de 30 de dezembro de 1991.** Estabelece normas de orientação à **Política Estadual de Recursos Hídricos** bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de **Recursos Hídricos**.

_____. **Lei nº 9.866, de 28 de novembro de 1997.** Dispõe sobre diretrizes e normas para a proteção e recuperação das bacias hidrográficas dos mananciais de interesse regional do Estado de São Paulo. Diário Oficial do Estado de São Paulo, de 29 de novembro de 1997, seção I, p. 01.

BRASIL. Lei 9.433 de 8 de Janeiro de 1997. **Política Nacional dos Recursos Hídricos.** Brasília, DF, 1997.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019.** Brasília: SNS/MDR, 2020. 183 p.

BRASIL. **Lei 9.433 de 8 de Janeiro de 1997.** Política Nacional dos Recursos Hídricos. Brasília, DF, 1997.

BRASIL. Lei 9.605. Lei da Vida – **A lei dos Crimes Ambientais.** Brasília, DF, 1998.

BRASIL. Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Congresso Nacional, Brasília, DF, 2010.

BRASIL. **Resolução CONAMA No 237 de 19 de setembro de 1997.** Dispõe sobre o licenciamento ambiental de atividades potencialmente poluidoras. Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 1997.

BRASIL. **Resolução CONAMA No 357 de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 2011.

BRASIL. **Resolução CONAMA No 430 de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as N° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 2011. BRASIL. **Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto - 2014.** Brasília: SNIS, 2019.

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

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios.** [S.l.]: Oficina dos Textos, 2013.

CORBET, S. P. “**The Design and Specification of Geotextiles and Geocomposites for Filtration and Drainage**”.1992. In: *Proc. Geofad'92: Geotextiles in Filtration and Drainage*, pp. 29-40, Cambridge, September.

CORDEIRO, J.S. **Disposição, tratabilidade e reuso de estações de tratamento de águas**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, 155p, 1981.

_____. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de águas**, EESC/USP - SHS, tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, 342p, 1993.

CORDEIRO, J.S. **Processamento de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs)**. In.: ANDREOLI, C.V. et al. Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, 2001.

CORDEIRO, J. S. ; BARROSO, M. M. ; ACHON, C. L. **Resíduos de estações de tratamento de água e a saúde ambiental**. In: 7ª Jornadas Técnicas Internacionais de Resíduos - Energia dos Resíduos. Porto, 2011.

CORDEIRO, J.S., REIS, R. F.; ACHON, C.L.; BARROSO, M. M. (2014). **Evolução dos Leitões de Drenagem (LD) no Brasil – uma década de avanços**. In: XXXIV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (AIDIS), Anais. Monterrey - México, 2 a 6 novembro de 2014, cod. 332-T8-Cordeiro-Brasil-1, 8 p.

CORNWELL, D. A.; MUTTER, R. N.; VANDERMEYDEN, C. **Commercial Application and Marketing of Water Plant Residuals**. Denver: American Water Works Association, 2000.

COSTA, Alberto Dias de Souza; Hillen, Leandro de Moura; FERREIRA, Rogério Gustavo; LERMONTOV, André. **Aplicação de geoforma linear no desaguamento de lodo de ETA - um estudo de caso na ETA secretário**, Petrópolis. In: XV Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte, 2012.

DELMAS, P., 2007. **Dewatering of waste and contaminated soils by using geotextile tubes**. CR of Geo-Environmental Engineering. In: 7th Japan-Korean-French Seminar, 22-24 May.

DEVORE, Jay L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências**. 9ªed. São Paulo, SP: Cengage, 2018. 656p.

DI BERNARDO, L., DI BERNARDO, A., CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água**. Editora Rima, São Carlos – SP, 2002.

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

DI BERNARDO, L.; SABOGAL, L. P. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**. São Carlos: Volume I Editora LDiBe, São Carlos - SP, 2008. 1560 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B; 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. B; 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.

FAURE, Y.H. et al. **Geotextile filter behaviour with critical filtration conditions**. In: BRAUNS, J.; HEIBAUM, M.; SCHULER, U. (Eds). *Filters in geotechnical and hydraulic engineering*. Rotterdam: Balkema. 1990. p. 209-2162. (Proc. First International Conference GeoFilters 1992, Karlsruhe)

FERREIRA FILHO, S.S.; ALÉM SOBRINHO. P. **Considerações sobre o tratamento de despejos líquidos gerados em estações de tratamento de água**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 3, n. 3, 1998.

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**. 161 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos/UFSCar. São Carlos, 2004.

FOWLER, J., DUKE, M., SCHMIDT, M.L., CRABTREE, B., BAGBBY, R.M., ETRAINER, E. **Dewatering sewage sludge and hazardous sludge with geotextile tubes**. In: 7ª Geossintéticos - ICG, 2002, Nice, págs. 1007-1012, 2002.

FRANÇA, S.C.A.; LOAYZA, P.E.V.; BROCCHI, E.A. **The use of natural polymers (chitosan and humic acid) in the red mud wastewater treatment**. In: *Proceedings of Enviromine 2015*, J. Chaves & F. Valenzuela (Eds.), Gecamin Publications, Chapter 05, Peru, 2015.

FREITAS, R. A. S. **Comportamento de geotêxteis como filtro em resíduos – fosfógeno e lama vermelha**. 2003. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

GAFFNEY, D. A; MARTIM, S. M.; MAHER, M. H. BENNETT, T. A. (1999). **Dewatering contaminated fine-grained material using geotextiles**. SI Geosolutions, 1999.

GARDONI, M.G.A. (2000). **Estudo de comportamento dreno-filtrante de geossintéticos sob compressão**. Dissertação de Doutorado, Publicação G.D.M-048A/00, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília (DF), Brasil, 313p.

GATTES, C. D., MCDERMOTT, R. P. **Characterization and conditioning of water treatment plant sludge**. Journal AWWA. Denver, v. 60, n. 3, pp. 33144, mar, 1968.

GHARAIBEH, A. M. **Drying of potable water treatment plant residuals**. Doctor of Philosophy thesis, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Wollongong, (2009).

GIROUD, J. P. (1996). **Granular filters and geotextile filters**. In: *GEOFILTERS*, Montréal. Proceedings...Montréal: [s.n.], 1996. p. 565 - 680.

GRANDIN, S.R. **Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água**. 1992. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.

GRZELAK, M. D.; MAURER, B. W.; PULLEN, T. S.; BHATIA, S. K.; RAMARAO, B. V. A comparison of test methods adopted for assessing geotextile tube dewatering performance. In: Geotechnical Special Publication, **Proceedings...**2011.

GUANAES, E. A.; GUIMARÃES, M. G. A.; DE CARVALHO URASHIMA, D.; PONTES, P. P. Análise laboratorial do desaguamento do lodo residual de estação de tratamento de água por meio de geossintéticos. **Educação & Tecnologia**, v. 14, n. 2, 2009.

GUIMARÃES, J. R.; NOUR, E. A. A. **Tratando nossos esgotos: processos que imitam a natureza**. Química Nova, n. especial, 2001.

GUIMARÃES, N.C., 2011, **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. Dissertação de M.Sc., UFOP, Minas Gerais, Brasil.

GUIMARÃES, M. G. A.; URASHIMA, D. de C.; VIDAL, D. de 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, **Anais...**2011.

GUIMARÃES, M. G. A. & Urashima, D. C. (2013) **Dewatering sludge in geotextile closed systems: Brazilian experience**. Soils & Rocks, Vol. 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, v. 21, n. 5, pp. 310-320.

HUANG, C.-C., LUO, S.-Y., (2007). **Dewatering of reservoir sediment slurry using woven geotextiles. Part I: experimental results**. Geosynth. Int. 14, 253 e 263.

JOHN, N.W. **Geotextiles**. Glasgow: Black and Son, (1987). 347 p.

KERBER, D. D. **Alternativa de contenção e desidratação natural de lodo na ETA do Passaúna (Curitiba –PR) através de contenção por GEOBAG®**. In: Simpósio Internacional de Ciências Integradas da UNAERP Campus Guarujá. São Paulo, 2008.

KHACHAN, M. M.; BHATIA, S. K.; BADER, R. A.; CETIN, D.; RAMARAO, B. V. Cationic starch flocculants as an alternative to synthetic polymers in geotextile tube dewatering. **Geosynthetics International**, 2014.

KOERNER, G.R., KOERNER, R.M. & FAHNY, R.F. W. (1994). **Long-term performance of geosynthetics in drainage applications**. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council Report 367, Washington, DC, 53p.

KOERNER, G.R., KOERNER, R.M. & FAHNY, R.F. W. (1996). **Field performance of geosynthetics highway drainage systems**. **Recent Developments in Geotextile**

Filters and Prefabricated Geocomposites, ASTM STP 1281, Shobha Bhatia et al. (eds), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, pp. 165-195.

KOERNER, G., KOERNER, R., 2006. **Geotextile tube assessment using a hanging bag test**. *Geotext. Geomembranes* 24, 129–137.

KOERNER, R. M.; KOERNER, G. R. Performance tests for the selection of fabrics and additives when used as geotextile bags, containers, and tubes. **Geotechnical Testing Journal**, 2010.

KOERNER, R. M.; KOERNER, G. R.; HUANG, W. Geotextile tubes for dewatering and 144 decontamination of fine-grained soils. In: **Geotextiles: From Design to Applications**. [s.l: s.n.]

KURODA, E. K. et al. **Drenagem / secagem de lodo de decantadores de ETAs em manta geotêxtil**. *Revista DAE*. n.194, p.24-34, jan./abr. 2013.

KURODA, E.K.; SILVEIRA, C.; MACEDO, J.G.; LIMA, M.S.P.; KAWAHIGASHI, F.; BATISTA, A.D.; CESÁRIO, S.M.C.P.S.; FERNANDES, F. **Drenagem / secagem de lodo de decantadores de ETAs em manta geotêxtil**. *Revista DAE*, n.194, p. 24-34, 2014.

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

LAWSON C. R. (2008). **Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering**. *Geosynthetics International* 6 (15) 384-427.

LCE-Laboratório de Caracterização Estrutural. DEMA (Departamento de Engenharia de Materiais), UFSCar, 2020.

LESHCHINSKY, D. **Issues in geosynthetic-reinforced soil**. In: INT. SYMP. ON EARTH REINFORCED PRACTICE. Kyushu, Japan. Balkerna, Rotterdam. Anais... 1992. pp. 871- 897.

LIMA, M. R. P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LIMA, R. M. de. **Desaguamento do lodo da estação de tratamento de água ETA 006 da cidade de Palmas-TO, por meio de polímeros e filtração em geotêxtil**. 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

LOAYZA, P.E.V. **Estudo da eficiência de polímeros naturais (quitosana e ácido húmico) na floculação e desaguamento de polpas minerais**. Dissertação (Mestrado), PUC-Rio, Rio de Janeiro, 172p., 2015.

LUDUVICE, Maurício; GONÇALVES, Ricardo Franci; LIMA, Márcia Regina Pereira; RAMALDES, Dalton Luis da Cunha; FERREIRA, Andréia Cristina; TELES, Claudia Rodrigues; ANDREOLI, Cleverson Vitorio. Desidratação de lodo de esgotos. cap.3. p. 56-86. In: ANDREOLI, Cleverson Vitorio (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento**:

processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: Rima Artes e Textos, 287 p, 2001.

LUSTOSA, J.B.; BRACARENSE, D.C.; CASTRO, F. M.S.; QUEIROZ, S.C.B.; SILVA, G. G., **Tratamento e aproveitamento de água de lavagem de filtro em estação de tratamento de água.** In: revista DAE, ed. n. 206. 2017.

LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. (2010). **Introdução ao Tratamento de Minérios.** Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. 5ª Edição. Rio de Janeiro, agosto de 2010.

LUZ, A. B. D.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios.** 5°. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MAURER, B.W., Gustafson GUSTAFSON, A.C., BHATIA, S.K., PALOMINO, A.M., 2012. **Geotextile dewatering of flocculated, fiber reinforced fly-ash slurry.** Fuel 97, 411 e 417.

MAURER, B. W.; GUSTAFSON, A. C.; BHATIA, S. K.; PALOMINO, A. M. **Geotextile dewatering of flocculated, fiber reinforced fly-ash slurry.** Fuel, 2012.

MENDONÇA, M. B. et al. 2000. **Ochre biofilm formation on geotextile filters in geotechnical works.** In: WOLSKI, W.; MLYRAREK, J. (Eds). Filters and drainage in geotechnical and environmental engineering. Rotterdam: Balkema. 2000. p. 223-229. (Proc. Third International Conference GeoFilters 2000, Warsaw).

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.** 4ed. Boston: McGraw Hill, 1819 p, 2003.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse.** 3rd ed. Revisão de George Tchobanoglous e Franklin L. Burton. New York: McGraw-Hill, 1991. 1334 p.

MIKI, Marcelo Kenji. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas.** 405 p., 2 v. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

MIKI, Marcelo Kenji; ALEM SOBRINHO, Pedro. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de Placas.** In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Rio de Janeiro, Brasil.

MIKI, Marcelo Kenji; ALEM SOBRINHO, Pedro; VAN HAANDEL, Adrianus Cornélio. **Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento, mecanizado e secagem térmica do lodo.** In: Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

MINATEL, M. M. **Influência de múltiplos fatores no desaguamento de lodo de ETA em leitos de drenagem.** 2021. 312 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana)- Universidade Federal de São Carlos, 2021.

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

MOO-YOUNG H.K., GAFFNEY, D.A., Mo, X., 2002. **Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile tubes.** Geotext. Geomembranes 20, 289e303.

MOREIRA, V. A. **Degradação de geotêxteis aplicados no desaguamento de resíduos e expostos às condições climáticas de campo.** 2017. 109 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

MORITA, D. M. **Disposição de lodo de estações de tratamento de água: atualização mundial e estudo em escala real em cerâmica vermelha.** In: XV Encontro Técnico da Associação dos Engenheiros da SABESP. 2004. Apresentação em Power Point, disponível em <[http://www.sabesp.com.br/sabesp/filesmng.nsf/DF6C53CCF001D57A832573F00072C0DD/\\$File/sabesp_lodos_ETA.pdf](http://www.sabesp.com.br/sabesp/filesmng.nsf/DF6C53CCF001D57A832573F00072C0DD/$File/sabesp_lodos_ETA.pdf)>, acesso em 20 dez. 2021.

MORITA, D.M.; SAMPAIO, A.O.; MIKI, M.K.; DAVID, A.C. **Incorporação de lodos em estações de tratamento de água em blocos cerâmicos.** Saneas, v. 1, p.7-12, 2002.

MORITA, D. M. et al. **Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte.** Revista DAE. v. 67 , n.219, p.128-158, out./dez. 2019.

MORTARA, F. C. **Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios.** Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 2011, 241p.

MÜLLER, M. **Efeito de diferentes configurações no deságue de lodos em sistemas de confinamento de resíduos em geotêxtil.** 2018. 101 f. Dissertação (Mestrado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2018.

MÜLLER, M.; VIDAL, D. D. M.; GUANAES, E. A. Adensamento de resíduo confinado no processo de desague em Sistema de Confinamento de Resíduos (SCR): Um estudo comparativo entre dados de campo e bibliografia. In: Anais XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Bahia, Brasil. **Anais...** Salvador, Bahia, Brasil: COBRAMSEG 2018, 2018.

MUÑOZ, Catarina Silveira. **Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis.** São José dos Campos, 2005. 119f. Tese de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – Área de Infra-Estrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2005.

MUTHUKUMARAN, A.E., ILAMPARUTHI, K., 2006. **Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering.** Geotext. Geomembranes 24 (4), 210–219.

NOVAK, J. T., O'BRIEN, J. H. **Conditioning of chemical sludges.** Journal Water Pollution Control Federation, V47, n.10, p.2397, Oct. 1975.

OLIVEIRA, M. L. M. D.; LUZ, J. A. M. D.; LACERDA, C. M. M. **Espessamento e Filtragem.** Ouro Preto, 2004.

OLIVEIRA, C.; RUBIO, J. **Mecanismos, técnicas e aplicações da agregação no tratamento mineral e ambiental**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2011.

PALMEIRA, E. M; GARDONI, M. G. **Geotextile in filtration: a state-of-the-art review and remaining challenges**. State-of-the-Art Report, International Symposium on Geosynthetics-GeoEng2000, Vol.1, Melbourne, 2000.

PALMEIRA, E. M. **Fatores condicionantes do comportamento de filtros geotêxteis**. In: Simpósio brasileiro de geossintéticos, 4., 2003, Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre: ABMS/IGS - Brasil, 2003. cd.

PALMEIRA, E.M (2018). **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. Editora Oficina de Textos, São Paulo - SP, 2018. 265 p.

PEARSE, M.J. **Historical use and future development of chemicals for solid-liquid separation in the mineral processing industry**. Minerals Engineering, 16, 103-108, 2003.

PIEPER, K. M. C. **Avaliação do uso de geossintético para o deságue e geocontenção de resíduos sólidos de estação de tratamento de água**. 2008. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PNSB (2017). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. **Abastecimento de água e esgotamento sanitário**/IBGE, coordenação de população e indicadores sociais. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/bibliotecacatalogoview=detalhes&id=2101734>. Acesso em 23 nov.2021.

PNSB (2010). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. 218 p. Acompanha 1 CD-ROM. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicao_de_vida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf. Acesso em: ago. 2021.

QUEIROZ, S.C. B. **Influência das características da água bruta no desaguamento de resíduos gerados no tratamento de água pela filtração em tubo geotêxtil**. 258f. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Ribeirão Preto, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Ribeirão Preto, 2019.

REALI, M. A. P. (1999). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: Abes, 250p.

REIS, R.F. **Estudo de Influência de Cobertura Plástica na Remoção de Água de Lodos de Estações de Tratamento de Água em Leitos de Drenagem**. 131p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos/UFSCar. São Carlos, 2011.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 2001.

ROCHA, A. P. F. **“Geotêxteis Matéria-prima”** Exposição feita no Porto em 8 Nov., Portugal, 11.1993.

ROLLIN, A. L., LOMBARD, G. **“Mechanisms Affecting Long-Term Filtration Behavior of Geotextiles”**. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 7, p.119-145, 1998.

SAAE, 2021. **Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos.**

SANTOS, B. F.; GIORDANO, A. **Proposta de um método de cálculo do tempo de sedimentação no tratamento de esgotos por lodos ativados em bateladas.** *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.10, n. 3, p. 185-193, 2005.

SANTOS, B. **Avaliação da aplicação do sistema de leito de drenagem com tratamento de lodo de estação de tratamento de água Bom Jardim em Uberlândia.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, 98 p., 2012.

SANTOS; L.S. **Estudo da durabilidade de geomembranas utilizadas na impermeabilização de reservatórios das barragens de rejeito de ouro.** Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, MG, 160 p, 2014.

SANTOS, B.; OLIVEIRA, A. L.; SALLA, M. R.; ALAMY FILHO, J. E.; PEREIRA, E. **Avaliação de sistema de leito de drenagem no desaguamento do lodo de estação de tratamento de água com ênfase na influência dos agentes externos na fase de ecagem.** *Ciência & Engenharia*, v. 23, n. 1, p. 65 -71, 2014.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto n. 8468, de 8 de setembro de 1976:** Aprova o Regulamento da Lei n.º 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. São Paulo, SP, Brasil. Diário Oficial - Executivo, 1976.

SÃO PAULO (Estado). **Lei n. 12.300 de 16 de março de 2006: Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes.** São Paulo, SP, Brasil. Diário Oficial -Executivo, 2006.

SATYAMURTHY, R., BHATIA, S.K., 2009. **Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles.** *Geosynth. Int.* 16, 83e 96.

SCALIONI, A. B; URASHIMA, D. C; GUIMARÃES, M. A. **Análise do Condicionamento Químico de Resíduos com Alto Teor de Líquido por Ensaio de Cone: Estudo de Caso com Lodo de ETA.** In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 9º, 2019. São Carlos. Anais

S, E. A.; GUIMARÃES, M. G. A.; DE CARVALHO URASHIMA, D.; PONTES, P. P. **Análise laboratorial do desaguamento do lodo residual de estação de tratamento de água por meio de geossintéticos.** *Educação & Tecnologia*, v. 14, n. 2, 2009.

SILVA, Celso Luiz da; SEGATO, Luciana Maturana. **Tratamento de líquidos filtrados por evaporação através do aproveitamento de gás de aterros sanitários.** In. Congresso Interamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ambiental, 2002, Cancún, México.

SILVA, L. C. F. **Utilização de tubos geotêxteis para confinamento, desaguamento e**

empilhamento de rejeito de ouro. 2017. 142 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SILVEIRA, C. **Desaguamento de lodos de Estações de tratamento de águas por leito de drenagem / secagem com manta geotêxtil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, 137 p., 2012.

SILVEIRA, CRISTIANE ; LIMA, M. S; MACEDO, J. G; SILVA S. M; KURODA. **Desaguamento de lodo de estação de tratamento de águas-ETAs por leitos de drenagem com mantas geotêxteis- escala reduzida.** Engenharia Sanitária e Ambiental (online), v. 26, p. 1-9, 2011.

SILVEIRA, CRISTIANE ; KURODA, E. K. ; ABE, CAMILA HIROMI ; YOSHIKI, LEONARDO ; HIROOKA, E. Y. . **Desaguamento do lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem/secagem.** Engenharia Sanitária e Ambiental (online), v. 20, p. 297-306, 2015.

SIMPSON, A.; BURGESS, P.; COLEMAN, S. J. (2002). **The Management of Potable Water Treatment Sludge: Present Situation in the UK.** In: Management of Wastes from Drinking Water Treatment, 2002, London. Proceedings. London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 2002. p.29-36.

SMOLLEN, M.; KAFAAR, A. **Electroosmotically enhanced sludge dewatering: Pilot- Plant Study.** Water Science Technology, v. 30, n.8, pp. 159-168, 1994.

SOUZA, L.O. **USO DE GEOTÊXTEL PARA A DESIDRATAÇÃO DE LODO DA ETE VILA DA BARCA-PA Belém-PA** (2016). Dissertação de Mestrado.

SPADA, J. L. G., 1991, **Ensaio de Filtração em Solos com Geotêxteis.** Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SPELLMAN, Frank R. **Dewatering biosolids.** Lancaster, Pa: Technomic Pub., 1997. 276 p.

STOLTZ, Philippe DELMAS, C. BARRAL. **Comparison of the behaviour of various geotextiles used in the filtration of clayey sludge: An experimental study.** Geotextiles and Geomembranes, Elsevier, 2019, 47 (2), pp.230-242. ff10.1016/j.geotextmem.2018.12.008ff. fhal-02608533.

TENCATE. **Geosynthetics.** Disponível em: .Acesso em: 2 de outubro de 2019.

TOMINAGA, E. **Análise dos procedimentos para avaliação de desempenho de sistemas fechados de geotêxtil para desaguamento.**2010. Disponível em: . Acesso em: 21 de Novembro de 2019.

TRIOLA, Mario F. **Introdução à Estatística.** 12ªed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 812p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Process Design Manual: Land Application of sewage sludge and domestic septage.** Washington, 1995. 290 p. Disponível em: <http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/municipal/landfill/flowctrl/report/appeniii.pdf>. Acesso em: 20 de novembro de 2019.

URASHIMA, B. My. C.; DE CARVALHO URASHIMA, D.; FERREIRA, S. R.; ÁLVARES, V. M.; LIMA, M. B. B.; CINTRA, J. P. G. Sistemas Fechados de Geotêxtil Empregados no Desaguamento de Resíduos de Estação de Tratamento de Água: Estudo de Caso. In: Anais XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Bahia, Brasil. **Anais...** Salvador, Bahia, Brasil: COBRAMSEG 2018.

URASHIMA, D. C.; MOREIRA, V. A.; GOMES, R. C.; SCALIONI, A. B.; GUIMARÃES, M. G. A. Sistema Fechado de Geotêxteis Empregados em Desaguamento de Resíduos: Análise da Durabilidade. In: Anais XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Bahia, Brasil. **Anais...** Salvador, Bahia, Brasil: COBRAMSEG 2018, 2018b.

URASHIMA, B. M.; URASHIMA, D. C.; GUIMARÃES, M. A. **Sistema de confinamento de resíduos empregando geotêxteis comparados a leito de drenagem para desaguamento de lodo de estação de tratamento de água.** Revista Brazilian Journal of Development., Curitiba, v. 6, n. 5, p. 25244-25260, maio. 2020.

URBAN, R. C.; ISAAC, R.L.; MORITA, D. M. **Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte.** Revista DAE, n.219, p. 128-58, 2009.

VAN HAANDEL, Adrianus Cornelius; ALEM SOBRINHO, Pedro. **Produção, composição e Constituição de lodo de esgoto.** cap 2. p. 7-28. In: ANDREOLI, Cleverson Vitorio (coord.). Alternativas de Uso de resíduos do Saneamento. Rio de Janeiro: ABES, 417p, 2006.

VERLICCHI, P., & MASOTTI, L. (s.d.). **Reuse of Drinking Water Treatment Sludges in Agriculture: Problems, Perspectives and Limitations.** Ferrara, Itália: Universidade de Ferrara.

VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos,** Edgard Blücher, São Paulo, 2004.

VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos.** São Paulo: Blucher, 2015, 2ª ed., 576 p.

VESILIND, P.A.; HSU, C.C. **Limits of sludge dewaterability.** Water Science Technology. v.36, n.11, pp. 87-91, 1997.

VIDAL, D.; URASHIMA, D. C.. Dimensionamento de filtros e drenos em geossintéticos. **Primeiro Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos. /Terceiro Simpósio Brasileiro de Geossintéticos,** Rio de Janeiro, v.1, 16 p. 1999.

VIDAL, C. M. DE S.; CAMPOS, J. R. **Coagulação associada à microfiltração para o tratamento avançado de esgoto sanitário.** Ambiência, v. 5, p. 101 – 114, 2009.

VON SPERLING, Marcos; VAN HAANDEL, AdrianusCornélius; JORDÃO, Eduardo Pacheco; CAMPOS, José Roberto; CYBIS, Luiz Fernando; AISSE, Miguel Mansur; ALEM SOBRINHO, Pedro. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por lodos ativados.** cap.5, p. 1-40. In: Carlos Augusto Lemos (Coord.). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Belo Horizonte: [s.n], 406 p, 2001.

WANG, Y. **Condicionamento de lodo de estação de tratamento de água: estudo de caso.** 1996. 419 p., 2 v. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.

WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF). **Sludge dewatering.** Washington D.C., 1983. 164 p. (Manual of practice no 20).

WEIR, S. e MOODY, G.M. **The importance of flocculant choice with consideration to mixing energy to achieve efficient solid-liquid separation.** Minerals Engineering, 16, 109-113, 2003.

ANEXO

- Fichas ensaio de cone e alternativo

GTNT400	ENSAIO DE CONE					
Polímero	Concentração (%)	Dosagem (ml/l)	Massa polímero (g/l H2O dest)	Turbidez (NTU)	Volume filtrado (ml)	Tempo (min) ou (seg) para percolar o volume
A-110 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,504	91,20	300	5
	0,05	10	0,504	41,30	305	3
	0,05	20	0,504	9,52	315	2
	0,1	5	1,002	35,60	290	5
	0,1	10	1,002	30,20	300	1
	0,1	20	1,002	49,30	310	5
	0,2	5	2,010	13,90	285	3
	0,2	10	2,010	54,50	310	1
	0,2	20	2,010	27,40	310	5
A-130 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,512	33,80	295	1
	0,05	10	0,512	11,30	320	1
	0,05	20	0,512	25,50	315	2
	0,1	5	1	13,00	280	1
	0,1	10	1	10,50	315	1
	0,1	20	1	21,50	305	6
	0,2	5	2	29,40	295	1
	0,2	10	2	31,50	290	1
	0,2	20	2	40,80	295	2
	0,05	5	0,501	21,70	295	3

C-495HMW CATIÔNICO	0,05	10	0,501	81,20	315	5
	0,05	20	0,501	9,67	320	2
	0,1	5	1,001	21,00	310	1
	0,1	10	1,001	14,40	315	4
	0,1	20	1,001	14,80	320	1
	0,2	5	2,005	23,00	300	2
	0,2	10	2,005	21,70	280	1
	0,2	20	2,005	22,40	300	1
C-496HMW CATIÔNICO	0,05	5	0,503	8,30	305	1
	0,05	10	0,503	9,10	305	1
	0,05	20	0,503	7,16	310	1
	0,1	5	1,004	8,16	315	1
	0,1	10	1,004	12,40	302	10/30s
	0,1	20	1,004	18,70	295	10/30s
	0,2	5	2,001	15,00	260	1
	0,2	10	2,001	14,60	270	1
	0,2	20	2,001	21,20	320	2

Apenas o lodo			
500 ml - agitar 5 minutos com agitador e barra magnética			
início	09:24	T (NTU)	V (ml)
fim (acabou H ₂ O)	09:48	575	313
OBS: 10 min ainda tinha H ₂ O			

GTNT900	ENSAIO DE CONE					
Polímero	Concentração (%)	Dosagem (ml/l)	Massa polímero (g/l H2O dest)	Turbidez (NTU)	Volume filtrado (ml)	Tempo (min) ou (seg) para percolar o volume
A-110 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,5	13,90	245	1
	0,05	10	1	14,90	255	1
	0,05	20	2	15,20	259	30
	0,1	5	0,5	15,20	235	30
	0,1	10	1	21,30	239	1
	0,1	20	2	29,30	240	2
	0,2	5	0,5	15,10	225	1
	0,2	10	1	20,00	230	1
	0,2	20	2	25,70	235	2
A-130 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,5	17,20	240	2
	0,05	10	1	16,10	245	2
	0,05	20	2	22,70	230	3
	0,1	5	0,5	12,70	255	4
	0,1	10	1	16,80	220	2
	0,1	20	2	24,70	250	2
	0,2	5	0,5	17,70	200	1
	0,2	10	1	31,00	195	1
	0,2	20	2	30,80	215	1
C-495HMW CATIÔNICO	0,05	5	0,5	23,70	240	3
	0,05	10	1	11,00	210	4
	0,05	20	2	22,30	235	3
	0,1	5	0,5	26,60	210	4
	0,1	10	1	26,10	190	2

	0,1	20	2	14,50	225	2
	0,2	5	0,5	15,10	205	2
	0,2	10	1	5,80	195	2
	0,2	20	2	7,72	215	2
C-496HMW CATIÔNICO	0,05	5	0,5	42,80	210	2
	0,05	10	1		230	3
	0,05	20	2	15,90	210	2
	0,1	5	0,5	21,50	190	2
	0,1	10	1	18,50	180	2
	0,1	20	2	17,10	175	2
	0,2	5	0,5	11,70	155	3
	0,2	10	1	15,70	185	3
	0,2	20	2	13,50	145	2

Apenas o lodo			
500 ml-a agitar 5 minutos com agitador e barra magnética			
início	12:15	T (NTU)	V(ml)
fim (acabou H ₂ O)	12:55	308	210
OBS: 20 min para acabar a H ₂ O			

GT80	ENSAIO DE CONE					
Polímero	Concentração (%)	Dosagem (ml/l)	Massa polímero (g/l H2O dest)	Turbidez (NTU)	Volume filtrado (ml)	Tempo (min) para percolar o volume
A-110 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,5	48,70	355	ainda havia H ₂ O
	0,05	10	1	14,90	320	ainda havia H ₂ O
	0,05	20	2	16,10	420	10
	0,1	5	0,5	29,50	180	ainda havia H ₂ O muita
	0,1	10	1	18,50	390	ainda havia H ₂ O
	0,1	20	2	30,70	355	ainda havia H ₂ O pouca
	0,2	5	0,5	51,70	330	ainda havia H ₂ O pouca
	0,2	10	1	31,00	390	ainda havia H ₂ O pouca
	0,2	20	2	24,40	305	ainda havia H ₂ O muita
A-130 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,5	53,20	235	ainda havia H ₂ O muita
	0,05	10	1	107,00	260	ainda havia H ₂ O pouca
	0,05	20	2	35,10	265	ainda havia H ₂ O muita
	0,1	5	0,5	90,50	375	ainda havia h H ₂ O pouca
	0,1	10	1	39,50	295	ainda havia H ₂ O muita
	0,1	20	2	15,60	395	7
	0,2	5	0,5	21,70	375	ainda havia H ₂ O
	0,2	10	1	45,00	395	ainda havia h H ₂ O pouca
	0,2	20	2	73,60	290	ainda havia H ₂ O
C-495HMW CATIONICO	0,05	5	0,5	222	135	ainda havia H ₂ O muita
	0,05	10	1	199	210	ainda havia H ₂ O
	0,05	20	2	149	215	ainda havia H ₂ O
	0,1	5	0,5	94,80	190	ainda havia H ₂ O
	0,1	10	1	16,30	210	ainda havia H ₂ O

	0,1	20	2	96,70	195	ainda havia H ₂ O
	0,2	5	0,5	135,00	380	ainda havia H ₂ O pouca
	0,2	10	1	34,60	325	ainda havia H ₂ O pouca
	0,2	20	2	29,50	365	ainda havia H ₂ O pouca
C-496HMW CATIÔNICO	0,05	5	0,5	68,00	410	muita pouca H ₂ O em 10 min
	0,05	10	1	82,60	420	muita pouca H ₂ O em 10 min
	0,05	20	2	36,60	425	muita pouca H ₂ O em 10 min
	0,1	5	0,5	65,70	380	muita pouca H ₂ O em 10 min
	0,1	10	1	26,00	455	8
	0,1	20	2	30,00	390	muita pouca H ₂ O em 10 min
	0,2	5	0,5	22,10	320	ainda havia H ₂ O
	0,2	10	1	26,20	395	8
	0,2	20	2	18,50	340	ainda havia H ₂ O

Apenas o lodo			
500 ml- agitar 5 minutos com agitador e barra magnética			
início	01/09/2021 14:30	T (NTU)	V(ml)
fim (acabou H ₂ O)	02/09/2021	210	440
OBS: 16h não havia acabado			

GTNT600		ENSAIO DE CONE				
Polímero	Concentração (%)	Dosagem (ml/l)	Massa polímero (g/l H2O dest)	Turbidez (NTU)	Volume filtrado (ml)	Tempo (min) ou (seg) para percolar o volume
A-110 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,5	12,60	340	2
	0,05	10	1	22,30	335	2
	0,05	20	2	26,3	370	1
	0,1	5	0,5	13,60	345	30s/1
	0,1	10	1	13,90	355	40s/1
	0,1	20	2	18,20	365	1
	0,2	5	0,5	10,70	345	30s
	0,2	10	1	15,00	325	30s
	0,2	20	2	48,30	325	1
A-130 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,5	15,30	415	1
	0,05	10	1	13,00	355	40s
	0,05	20	2	14,90	405	40s
	0,1	5	0,5	18,20	350	30s
	0,1	10	1	14,60	340	30s
	0,1	20	2	15,40	340	30s
	0,2	5	0,5	13,50	330	20s
	0,2	10	1	3,70	325	10s
	0,2	20	2	42,10	355	1
C-495HMW CATIÔNICO	0,05	5	0,5	21,10	360	2
	0,05	10	1	27,80	355	2
	0,05	20	2	27,00	340	2
	0,1	5	0,5	17,10	350	1
	0,1	10	1	11,00	360	1

	0,1	20	2	18,80	375	1
	0,2	5	0,5	7,83	355	1
	0,2	10	1	10,40	365	45s
	0,2	20	2	44,50	360	1
C-496HMW CATIÔNICO	0,05	5	0,5	8,64	390	1
	0,05	10	1	10,50	340	1
	0,05	20	2	16,80	375	1
	0,1	5	0,5	13,50	365	1
	0,1	10	1	13,40	360	1
	0,1	20	2	12,30	390	1
	0,2	5	0,5	12,90	335	1
	0,2	10	1	8,88	320	1
	0,2	20	2	14,60	345	1

Apenas o lodo			
500 ml- agitar 5 minutos com agitador e barra magnética			
início	12:35	T (NTU)	V(ml)
fim (acabou H ₂ O)	12 45/ 12:53 (fim)	471	335
OBS: ainda tinha H ₂ O pouca			

GTNT600	ENSAIO ALTERNATIVO				
Polímero	Concentração (%)	Dosagem (ml/l)	Massa polímero (g/l H2O dest)	Turbidez (NTU)	Volume filtrado (ml)
A-110 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,5	27,00	345
	0,05	10	1	137,00	370
	0,05	20	2	35	365
	0,1	5	0,5	20,89	395
	0,1	10	1	25,80	390
	0,1	20	2	25,00	415
	0,2	5	0,5	26,20	365
	0,2	10	1	36,50	360
	0,2	20	2	34,10	380
A-130 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,5	31,60	365
	0,05	10	1	20,10	350
	0,05	20	2	26,60	330
	0,1	5	0,5	22,70	385
	0,1	10	1	24,40	360
	0,1	20	2	40,80	345
	0,2	5	0,5	26,10	370
	0,2	10	1	27,10	310
	0,2	20	2	44,20	390
C-495HMW CATIONICO	0,05	5	0,5	37,90	3400
	0,05	10	1	35,10	310
	0,05	20	2	49,50	385
	0,1	5	0,5	51,60	380
	0,1	10	1	36,40	380
	0,1	20	2	74,40	385
	0,2	5	0,5	14,30	360
	0,2	10	1	20,10	390
	0,2	20	2	17,80	350
	0,05	5	0,5	104	360
	0,05	10	1	117	340
	0,05	20	2	16,90	375
	0,1	5	0,5	37,60	350

C-496HMW CATIÔNICO	0,1	10	1	31,50	365
	0,1	20	2	20,20	375
	0,2	5	0,5	69,60	340
	0,2	10	1	19,40	370
	0,2	20	2	15,70	370

Apenas o lodo			
500 ml- agitar 5 minutos com agitador e barra magnética			
		T (NTU)	V(ml)
início	17:01		
fim (acabou H ₂ O)	17:11/17:19:49	729	350
OBS: 10 min ainda havia H ₂ O continuei			

GTNT400		ENSAIO ALTERNATIVO			
Polímero	Concentração (%)	Dosagem (ml/l)	Massa polímero (g/l H2O dest)	Turbidez (NTU)	Volume filtrado (ml)
A-110 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,5	164,00	375
	0,05	10	1	52,10	380
	0,05	20	2	25,30	390
	0,1	5	0,5	44,40	400
	0,1	10	1	19,70	365
	0,1	20	2	23,50	405
	0,2	5	0,5	24,50	420
	0,2	10	1	17,50	395
	0,2	20	2	24,60	375
A-130 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,5	193	410
	0,05	10	1	199	390
	0,05	20	2	89,50	415
	0,1	5	0,5	24,90	385
	0,1	10	1	529,00	365
	0,1	20	2	38,60	390
	0,2	5	0,5	26,90	370
	0,2	10	1	62,30	370
	0,2	20	2	49,50	340
C-495HMW CATIÔNICO	0,05	5	0,5	449	410
	0,05	10	1	277	430
	0,05	20	2	49,80	400
	0,1	5	0,5	139,00	385
	0,1	10	1	54,40	400

	0,1	20	2	21,50	395
	0,2	5	0,5	78,90	365
	0,2	10	1	18,30	350
	0,2	20	2	11,70	380
C-496HMW CATIÔNICO	0,05	5	0,5	218	400
	0,05	10	1	833	360
	0,05	20	2	69,60	375
	0,1	5	0,5	124	360
	0,1	10	1	165	365
	0,1	20	2	204	355
	0,2	5	0,5	104	360
	0,2	10	1	162	320
	0,2	20	2	11,60	390

Apenas o lodo			
500 ml- agitar 5 minutos com agitador e barra magnética			
início	16:01	T (NTU)	V(ml)
fim (acabou H ₂ O)	16:39/16:49	829	340
OBS: 10 min ainda havia H ₂ O continuei			

GTNT900	ENSAIO ALTERNATIVO				
Polímero	Concentração (%)	Dosagem (ml/l)	Massa polímero (g/l H2O dest)	Turbidez (NTU)	Volume filtrado (ml)
A-110 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,504	45,70	350
	0,05	10	0,504	94,70	365
	0,05	20	0,504	23,70	380
	0,1	5	1,002	18,40	360
	0,1	10	1,002	47,30	355
	0,1	20	1,002	21,10	360
	0,2	5	2,010	90,60	365
	0,2	10	2,010	25,30	350
	0,2	20	2,010	19,50	380
A-130 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,512	31,20	340
	0,05	10	0,512	76,80	350
	0,05	20	0,512	34,00	360
	0,1	5	1	47,30	345
	0,1	10	1	53,90	330
	0,1	20	1	13,40	330
	0,2	5	2	71,30	315
	0,2	10	2	34,80	300
	0,2	20	2	30,50	345
	0,05	5	0,501	40,00	330
	0,05	10	0,501	71,60	335
	0,05	20	0,501	29,00	350
	0,1	5	1,001	41,30	380

C-495HMW CATIÔNICO	0,1	10	1,001	71,90	360
	0,1	20	1,001	18,90	345
	0,2	5	2,005	84,10	355
	0,2	10	2,005	8,50	310
	0,2	20	2,005	12,80	295
C-496HMW CATIÔNICO	0,05	5	0,503	256,50	345
	0,05	10	0,503	82,60	365
	0,05	20	0,503	34,60	370
	0,1	5	1,004	47,60	335
	0,1	10	1,004	52,60	370
	0,1	20	1,004	243,00	335
	0,2	5	2,001	25,90	300
	0,2	10	2,001	14,20	320
	0,2	20	2,001	22,10	325

Apenas o lodo			
500 ml- agitar 5 minutos com agitador e barra magnética			
início	12:00	T (NTU)	V(ml)
fim (acabou H ₂ O)	12: 43	184	265
OBS: 10 min ainda tinha H ₂ O			

GT80	ENSAIO ALTERNATIVO				
Polímero	Concentração (%)	Dosagem (ml/l)	Massa polímero (g/l H2O dest)	Turbidez (NTU)	Volume filtrado (ml)
A-110 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,504	237	310
	0,05	10	0,504	344	125
	0,05	20	0,504	74,90	375
	0,1	5	1,002	200,00	415
	0,1	10	1,002	148,00	410
	0,1	20	1,002	120,00	210
	0,2	5	2,010	87,50	385
	0,2	10	2,010	51,10	380
	0,2	20	2,010	35,40	345
A-130 HMW ANIÔNICO	0,05	5	0,512	286	310
	0,05	10	0,512	191	410
	0,05	20	0,512	98,00	330
	0,1	5	1	N leu	355
	0,1	10	1	41,30	385
	0,1	20	1	45,80	360
	0,2	5	2	107,00	335
	0,2	10	2	45,90	210
	0,2	20	2	55,60	295
C-495HMW CATIÔNICO	0,05	5	0,501	331	150
	0,05	10	0,501	886	260
	0,05	20	0,501	83,10	115
	0,1	5	1,001	329	200
	0,1	10	1,001	88,70	325

	0,1	20	1,001	67,10	355
	0,2	5	2,005	96,00	395
	0,2	10	2,005	34,10	395
	0,2	20	2,005	48,80	300
C-496HMW CATIÔNICO	0,05	5	0,503	159	240
	0,05	10	0,503	167	140
	0,05	20	0,503	113	155
	0,1	5	1,004	218	165
	0,1	10	1,004	90,20	190
	0,1	20	1,004	162,00	125
	0,2	5	2,001	158	75
	0,2	10	2,001	49,40	260
	0,2	20	2,001	210	155

Apenas o lodo			
500 ml- agitar 5 minutos com agitador e barra magnética			
início	11:19	T (NTU)	V(ml)
fim (acabou H ₂ O)	12: 51	210	175
OBS: 10 min ainda tinha H ₂ O			