

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

**INFLUÊNCIA DE MÚLTIPLOS FATORES NO DESAGUAMENTO
DE LODO DE ETA EM LEITOS DE DRENAGEM**

MATHEUS MORAIS MINATEL

São Carlos

2021

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

INFLUÊNCIA DE MÚLTIPLOS FATORES NO DESAGUAMENTO
DE LODO DE ETA EM LEITOS DE DRENAGEM

MATHEUS MORAIS MINATEL

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^a. Cali Laguna
Achon

Co-orientação: Prof. Dr. Renan Felício
dos Reis

São Carlos
2021

Morais Minatel, Matheus

Influência de múltiplos fatores no desaguamento de lodo de ETA em leitos de drenagem / Matheus Moraes Minatel -- 2020.
312f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos
Orientador (a): Cali Laguna Achon
Banca Examinadora: Daniel Jadyr Leite Costa, Ricardo de Lima Isaac
Bibliografia

1. Lodo de ETA. 2. Desaguamento. 3. Leito de drenagem.
I. Moraes Minatel, Matheus. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Matheus Morais Minatel, realizada em 30/10/2020.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Cali Laguna Achon (UFSCar)

Prof. Dr. Daniel Jadyr Leite Costa (UFSCar)

Prof. Dr. Ricardo de Lima Isaac (UNICAMP)

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.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Ruth, por ter me ensinado a lutar.

Ao meu pai Donizeti, por ter me ensinado a trabalhar.

À minha irmã Martha, por ter me ensinado a estudar.

Ao meu irmão Marcelo por ter me ensinado a aceitar.

À minha esposa Alane, por ter me ensinado a amar.

À minha sogra Alaíti, por ter me ensinado a superar.

À minha orientadora Cali, por ter me ensinado a pesquisar.

Ao Kleiton e ao professor Fernando, por terem me ensinado a ajudar.

Ao meu filho Joaquim, por ter dado sentido a cada aprendizado e ter me ensinado a sorrir novamente.

A Deus, por ter me dado saúde e o privilégio de ter aprendido com cada uma destas pessoas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa, Projeto Universal 01/2016 Faixa A, Processo Nº 424639/2016-5.

RESUMO

O lodo gerado em Estações de Tratamento de Água (ETA) possui alto teor de umidade, normalmente acima de 95%, e é considerado como resíduo sólido de acordo com a Lei 12.305/2010, que prevê, como ordem de prioridade a não geração, redução, seguido do reuso e reciclagem. A redução do volume do lodo de ETA pode ser realizada através do desaguamento, que consiste na remoção da água livre, sobrenadante e encontrada nos interstícios dos sólidos, usando sistemas naturais ou mecânicos. Dentre os sistemas naturais de desaguamento o Leito de Drenagem (LD) têm se mostrado promissor, no entanto, seu adequado dimensionamento necessita de pesquisas mais aprofundadas. Assim, o objetivo principal desta pesquisa foi estudar 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. Para tanto, foi construído um sistema de Leitos de Drenagem em escala de bancada, sendo realizado ao todo 335 drenagens, usando 6 tipos diferentes de geotêxtil; 6 teores de sólidos totais (ST) do lodo bruto e 5 alturas de camada de lodo. A análise dos resultados permitiu concluir que a estabilização do pré-filtro formado pela sedimentação dos sólidos presentes no lodo sobre o leito tem ação preponderante no processo de drenagem em relação ao tipo de geotêxtil. Concluiu-se, também, que 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 são pouco eficientes em promover líquidos drenados com boa qualidade; a abertura de filtração do geotêxtil tecido está relacionada à promoção de drenados com valores elevados de cor aparente; e a caracterização dos lodos, principalmente em relação à distribuição granulométrica e sua composição, podem influenciar no processo de drenagem.

Palavras-Chaves: Resíduos Sólidos. lodo de ETA. Desaguamento. Leito de Drenagem. Sistemas Naturais.

ABSTRACT

The sludge generated in Water Treatment Plants (WTP) has a high moisture content, normally greater than 95%, and is considered to be solid waste according to Law 12,305/2010, which foresees non-generation and reduction of solid waste as priorities, closely followed by reuse and recycling. The volume reduction of WTP sludge can be carried out through dewatering, a process consisting of the removal of free water, which is supernatant and can be found in the interstices of solids, using natural or mechanical systems. Among the natural dewatering systems, Draining Beds (DB) have shown promise, however, the process needs to be further researched. Thus, the main objective of this research was to study the influence of multiple factors, such as sludge solids content, sludge layer height, solids application rate (SAR) and different types of geotextiles, during the free water drainage stage of the dewatering process using DB. For this purpose, a Draining Bed system was built at bench scale, with a total of 335 drainage simulations being carried out, using 6 different types of geotextiles; 6 raw sludge total solids (TS) contents and 5 sludge layer heights. The analysis of the results allowed us to conclude that the stabilization of a pre-filter formed by the sedimentation of solids present in the sludge has an overriding role in the drainage process compared to the role of the different types of geotextiles. It was also concluded that the TS content of the raw sludge has an indirect relationship with the final percentage of drained liquid; the beds with higher SAR had higher percentages of good quality drained liquid and registered longer times until the end of free water flow; the drainage in beds with small sludge layer height and low levels of TS is not very efficient in promoting good quality drained liquids; the filter opening in the geotextile fabric is related to the promotion of drained liquids with high apparent color rates; and the characterization of the different types of sludges, mainly regarding particle size distribution and composition, can influence the drainage process.

Keywords: Solid waste. WTP sludge. Dewatering. Draining Beds. Natural systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Ilustração de uma ETA convencional e locais de geração de resíduos.....	34
Figura 3.2 - Classificação dos Sólidos.....	38
Figura 3.3 - Frações de água constituintes dos lodos de ETAs	40
Figura 3.4 - Evolução da sedimentação do tipo sazonal.....	41
Figura 3.5 - Síntese dos impactos ambientais do lançamento in-natura dos resíduos de ETA em corpos 'd'água.....	43
Figura 3.6 - Diagrama de Ishikawa - Destinação e disposição final inadequadas dos resíduos da ETA.....	44
Figura 3.7 - Funcionários utilizando mangueiras d'água a alta pressão para facilitar a remoção do lodo do fundo do decantador de uma ETA.....	45
Figura 3.8 - Funcionários se esforçam para remover a camada espessa de lodo com o auxílio de rodos de madeira.	45
Figura 3.9 - Fases do desaguamento de lodo de ETA em Leito de Drenagem, segundo Barroso (2007).....	55
Figura 3.10 - (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 utilizada dos por Barroso (2007).	58
Figura 3.11 - (a) Vista do Leito de Drenagem II utilizado por Barroso (2007). (b) protótipos cilindros do Leito de Drenagem III Utilizados por Barroso (2007).....	59
Figura 3.12 - (a) "Minileito" de drenagem utilizado por Reis (2011)). (b) despejo no "minileito" de drenagem utilizado por Reis (2011).....	61
Figura 3.13 - (a) esquema do Leito de drenagem em escala reduzida utilizado por Silveira (2012) (2012). (b) Foto do Leito de drenagem utilizado por Silveira (2012)..	63
Figura 3.14 - (a) esquema do Leito de drenagem em escala Piloto utilizado por SILVEIRA, C. (2012). (b) Foto do Leito de drenagem em escala piloto utilizado por SILVEIRA, C. (2012).	63
Figura 3.15 - (a) Esquema do Leito de drenagem utilizado por SANTOS, (2012). (b) Foto do Leito de drenagem utilizado por SANTOS (2012).....	65
Figura 3.16 - Planta e corte dos módulos do Leito de Drenagem implantados por Fontana (2004).....	67

Figura 3.17 - Leito de drenagem ETA Guaíra - (a) Disposição do Geotêxtil. (b) Leito de drenagem Cheio de resíduo. (c) Lodo Seco.....	69
Figura 3.18 - Fluxograma de implantação de sistema de reuso e drenagem de resíduos de ETA com filtração direta.....	70
Figura 3.19 - Arranjo estrutural dos geotêxteis tecido e não tecido.....	71
Figura 3.20 - Forma de colmatação física do geotêxtil.....	74
Figura 4.1 - Esquema de instalação e detalhe do Sistema de desaguamento de lodo em Leito de Drenagem (LD).....	80
Figura 4.2 - Foto do Sistema de desaguamento de lodo em Leito de Drenagem (LD) utilizado nesta pesquisa.....	81
Figura 4.3 - Lodo acumulado no decantador da ETA de São Carlos durante a limpeza para remoção do lodo.....	85
Figura 4.4 - Coleta de lodo na ETA de São Carlos - (a) Decantador no momento da limpeza. (b) Coleta do lodo do decantador. (c) Despejo do lodo nas bombonas para armazenamento.....	86
Figura 4.5 - Peneiramento do lodo bruto com %ST em torno de 9,0%.....	87
Figura 4.6 - Etapas de preparação das amostras de lodo com concentração se sólidos pré-definidas.....	88
Figura 4.7 - Esquema ilustrativo dos ensaios de desaguamento de lodo no Sistema de Leito de Drenagem para cada tipo de manta, realizados em duplicata (dimensões em centímetro).....	93
Figura 4.8 - Retração do lodo antes da retirada das amostras dos geotêxteis para realização dos ensaios MEV/EDS.....	98
Figura 5.1 - Fotografia de um dos ensaios realizados, variando a altura da camada de lodo aplicada.....	109
Figura 5.2 - Porcentagem de água livre drenada e Taxa de <i>Vazão</i> para o Ensaio 7 com geotêxtil de 600g.m ⁻² e %ST=1,0 para a primeira campanha de coleta de lodo.	114
Figura 5.3 - Volume de água drenada no intervalo (L.m ⁻²) para o Ensaio 7 com geotêxtil de 600g.m ⁻² e %ST=1,0 para a primeira campanha de coleta de lodo.....	115
Figura 5.4 - Valores de turbidez e cor aparente para o Ensaio 7 com geotêxtil de 600g.m ⁻² e %ST=1,0, para a primeira campanha de coleta de lodo.....	118

Figura 5.5 - Comparação visual dos parâmetros de qualidade do drenado para o Ensaio 34 com %ST do lodo de 3,0 utilizando geotêxtil NT de 300.m-2 para a primeira campanha de coleta de lodo.	119
Figura 5.6 - Variação de pH durante a drenagem para o Ensaio 34 com geotêxtil de 300g.m-2 e %ST=3,0. E lodo da 1° campanha de coleta.....	120
Figura 5.7 - (a) Foto do LD com H=50cm, %ST=2,0 após 6 dias de drenagem. (b) Detalhe da interfase entre os sólidos sedimentados no LD e a água decantada. ...	122
Figura 5.8 - Parâmetros de qualidade, Taxa de Vazão e porcentagem de água livre drenada para os ensaios com geotêxtil de 600g.m-2 , H=40 com diferentes %ST....	124
Figura 5.9 - Parâmetros de qualidade, Taxa de Vazão e volume de água drenada no intervalo (L.m-2) para os ensaios com TAS=7,5kg.m-2, diferentes alturas de camada de lodo e geotêxteis	126
Figura 5.10 - Parâmetros de qualidade, Taxa de Vazão e porcentagem de água livre drenada para os ensaio com diferentes geotêxteis; H=40 com %ST=2,0.	128
Figura 5.11 - Valores de cor aparente e turbidez para ensaios com geotêxtil NT de 500g.m-2 e %ST=1,5 para lodos da 1° e 2° campanha de coleta	130
Figura 5.12 - Valores Porcentagem drenada e volume drenado para ensaios com geotêxtil NT de 400g.m-2 e %ST=3,0 para lodos da 1° e 2° campanha de coleta..	131
Figura 5.13 - Taxa de vazão observada e estimada para os leitos onde não se observou o término do fluxo no período de observação.	134
Figura 5.14 - Término das drenagens em dias, considerando as 355 drenagens realizadas.	135
Figura 5.15 - Fim da drenagem para as 17 TAS consideradas e agrupamento considerado nos histogramas.....	141
Figura 5.16 - Gráfico dos resíduos para o modelo 1 Fim da Drenagem em Dias....	147
Figura 5.17 - Gráfico dos resíduos para o modelo 1, Fim da Drenagem em Dias, com escala logarítmica.....	148
Figura 5.18 - Gráfico dos resíduos para o modelo 2, porcentagem do drenado em relação ao volume do Lodo aplicado no leito	150
Figura 5.19 - Gráfico dos resíduos para o modelo 3, Porcentagem do drenado com Cor Aparente Inferior a 75 uH	152
Figura 5.20 - Gráfico dos resíduos para o modelo 3, Porcentagem do drenado com Cor Aparente Inferior a 75 uH, após retirada dos outliers.....	153
Figura 5.21 - Gráfico dos resíduos para o modelo 4	154

Figura 5.22 - Gráfico dos resíduos para o modelo 4 retirando os outliers.....	155
Figura 5.23 - Massa de lodo retida nos leitos após os desguamentos por LD.....	162
Figura 5.24 - Micrografias da amostra de lodo da 1° campanha de coleta - imagens com aumento de 100x e 500x.....	169
Figura 5.25 - Micrografias da amostra de lodo da 1° campanha de coleta - imagens com aumento de 100x e 2000x.....	170
Figura 5.26 - Micrografias do geotêxtil de 600g.m ⁻² , imagens com aumento de 100x e 1000x.....	173
Figura 5.27 - Micrografias do geotêxtil de 500g.m ⁻² , imagens com aumento de 100x e 1000x.....	173
Figura 5.28 - Micrografias do geotêxtil de 400g.m ⁻² , imagens com aumento de 100x e 1000x.....	174
Figura 5.29 - Micrografias do geotêxtil de 300g.m ⁻² , imagens com aumento de 100x e 1000x.....	174
Figura 5.30 - Micrografias do geotêxtil de 55/55UV, imagens com aumento de 100x e 1000x.....	175
Figura 5.31 - Micrografias do geotêxtil de 105/105DW, imagens com aumento de 100x e 1000x.....	175
Figura 5.32 - (a) Micrografia de geotêxtil NT 100% poliéster estudado por Ardila (2020) com gramatura de 895g.m ⁻² . (b) Micrografia de geotêxtil NT 100% poliéster estudado nessa pesquisa, com gramatura de 600g.m ⁻² . (geotêxteis virgens, imagens com aumento de 1000x).....	178
Figura 5.33 - Micrografias do geotêxtil usado de 600g.m ⁻² , imagens com aumento de 100x e 1000x.....	181
Figura 5.34 - Micrografias do geotêxtil usado de 500g.m ⁻² , imagens com aumento de 100x e 1000x.....	181
Figura 5.35 - Micrografias do geotêxtil usado de 400g.m ⁻² , imagens com aumento de 100x e 1000x.....	181
Figura 5.36 - Micrografias do geotêxtil usado de 300g.m ⁻² , imagens com aumento de 100x e 1000x.....	182
Figura 5.37 - Micrografias do geotêxtil usado de 55/55UV, imagens com aumento de 100x e 1000x.....	183
Figura 5.38 - Micrografias do geotêxtil usado de 105/105DW, imagens com aumento de 100x e 1000x.....	183

Figura 5.39 - Resultado da identificação de fases da amostra do lodo da 1° campanha de coleta por DRX.....	185
Figura 5.40 - Resultado da identificação de fases da amostra do lodo da 2° campanha de coleta por DRX.....	185
Figura 5.41 - Curva de distribuição de tamanhos das partículas em massa acumulada por diâmetro de esfera equivalente para os lodos brutos da 1° e 2° campanha de coleta.....	186

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Série de sólidos dos lodos utilizados por Fontana (2004).....	39
Tabela 3.2 - Opções de uso benéfico do lodo de ETA.....	48
Tabela 3.3 - Principais vantagens e desvantagens das tecnologias de desaguamento por sistemas mecanizados e naturais, de acordo com Di Bernardo e Dantas (2005).....	50
Tabela 3.4 - Vantagens e desvantagens específicas de algumas técnicas de desaguamento.....	51
Tabela 3.5 - Características da manta geotêxtil utilizada nos ensaios de desaguamento de lodo em Leito de Drenagem (LD).....	54
Tabela 3.6 - Teor de sólidos nos desaguamentos realizados por Barroso (2007)	59
Tabela 3.7 - Evolução do teor de sólidos nos ensaios realizados por Reis (2011)	62
Tabela 3.8 - Resultados dos ensaios de desaguamento por LD realizados por Silveira (2012).....	64
Tabela 3.9 - Resumo dos resultados observados por Santos (2012).....	65
Tabela 3.10 - Resumo geral das pesquisas brasileira, sobre Leito de Drenagem, que usam geotêxteis.....	74
Tabela 4.1 - Sistematização dos ensaios de desaguamento para um tipo de geotêxtil.....	90
Tabela 4.2 - Geotêxteis utilizados nesta pesquisa.....	94
Tabela 4.3 - Ensaios realizados para caracterização dos geotêxteis.....	94
Tabela 4.4 - Micro e macropropriedades e métodos usados na caracterização dos lodos de ETA utilizados na pesquisa.....	95
Tabela 5.1 - Resumo dos 67 ensaios de desaguamento com a numeração de páginas como índice para consulta aos gráficos no APÊNDICE III.....	110
Tabela 5.2 - Teste de Normalidade Shapiro-Wilk.....	142

Tabela 5.3 - Análise de correlação considerando a campanha de coleta de lodo como variável qualitativa.....	143
Tabela 5.4 - Análise de correlação considerando os geotêxteis como variáveis qualitativas.....	144
Tabela 5.5 - Tabela com a descrição do ajuste do modelo 1 com escala logarítmica.....	149
Tabela 5.6 - Tabela com a descrição do ajuste do modelo 2.....	151
Tabela 5.7 - Tabela com a descrição do ajuste do modelo 2.....	153
Tabela 5.8 - Tabela com a descrição do ajuste do modelo 4.....	155
Tabela 5.9 - Altura máxima de aplicação de lodo para término das drenagens em até 5 dias, considerando diferentes %ST estudadas, para os ensaios com TAS abaixo de 10 Kg.m-2.....	159
Tabela 5.10 - Qualidade dos líquidos decantados sobre os leitos para os ensaios que não finalizaram no período de observação dos ensaios.....	160
Tabela 5.11 - Teor de sólidos retidos no leito após o término da drenagem para segunda campanha de coleta de amostras.....	163
Tabela 5.12 - Resultados das análises de concentrações de metais, série de sólidos e COT para os lodos da 1° e 2° campanha de coleta.....	165
Tabela 5.13 - Resultados da caracterização física e hidráulica dos Geotêxteis estudados nessa pesquisa e dos valores apresentados pelos fabricantes.....	167
Tabela 5.14 - Porcentagem dos elementos químicos nos pontos observados nas amostras.....	171
Tabela 5.15 - Identificação qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presente nas amostras de geotêxteis novos (sem uso).....	176
Tabela 5.16 - Identificação qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presente nas amostras de geotêxteis após as drenagens.....	180
Tabela 5.17 - Identificação qualitativa dos componentes químicos encontrado nos lodos da 1° e 2° campanha de coleta de lodo.....	184

Tabela 5.18 - Distribuição de tamanhos das partículas em massa acumulada por diâmetro de esfera equivalente para os lodos brutos da 1° e 2° campanha de coleta.....	187
Tabela 9.1 - Porcentagem dos drenados com cor aparente inferior a 75 uH para os 335 desaguamentos realizados.....	202
Tabela 9.2 - Porcentagem dos drenados com Turbidez inferior a 40uT, 100uT e 10uT.....	204
Tabela 9.3 - Porcentagem do volume drenado final em relação ao volume de lodo aplicado.....	214
Tabela 9.4 - Índice dos Histogramas.....	217

LISTA DE SIGLAS

%ST - Teor de sólidos totais
ALAF - Água de lavagem de filtros
CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente
ETA - Estação de Tratamento de Água
ETE - Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LD - Leito de Drenagem
pH - Potencial Hidrogeniônico
TAS -Taxa de Aplicação de Sólidos Totais (kg.m^{-2})

SIGLAS DOS GRÁFICOS E TABELAS

%DR - Porcentagem de lodo drenado acumulado
105 - Geotêxtil tecido 105/105 DW
300 - Geotêxtil não tecido de 300g.m^2
400 - Geotêxtil não tecido de 400g.m^2
500 - Geotêxtil não tecido de 500g.m^2
55 - Geotêxtil tecido 55/55 UV
600 - Geotêxtil não tecido de 600g.m^2
Co - Cor aparentes uH
H - Altura da camada de lodo aplicada no leito (cm)
Q - Taxa de vazão (L.min.m^{-2})
ST - porcentagem de sólidos totais
Ta - Taxa de aplicação de sólidos (kg.m^{-2})
Tu -Turbidez uT
V - Volume drenado no intervalo em 1m^2 de geotêxtil (L.m^{-2})

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	OBJETIVOS.....	25
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	26
3.1	ASPECTOS GERAIS SOBRE A ÁGUA DE ABASTECIMENTO	26
3.1.1	Considerações sobre os parâmetros físicos, químicos e biológicos da água para abastecimento público.....	28
3.1.2	Legislação aplicada as ETAs e aos resíduos gerados.....	30
3.3	LODO GERADO EM ETA: ASPECTOS GERAIS	36
•	Sedimentabilidade	40
3.4	DESTINAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS DE ETAS	42
3.4.1	Reuso e reciclagem de resíduos de ETAs	46
3.5	SISTEMAS DE DESAGUAMENTO DE LODO DE ETA	49
3.6	LEITO DE DRENAGEM (LD): ASPECTOS GERAIS	53
3.6.1	Leito de Drenagem: pesquisas em escala laboratorial e piloto	57
3.6.2	Leito de Drenagem: pesquisas em escala real.....	66
3.7	GEOTÊXTEIS USANDO EM SISTEMAS DE DESAGUAMENTO E LD.....	70
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	77
4.1	EQUIPAMENTO PARA OS ENSAIOS – CONSTRUÇÃO E IMPLANTAÇÃO	78
4.1.1	Sistema de Leito de Drenagem em escala de bancada.....	79
4.1.2	Medição de Vazão dos ensaios de desaguamento em LD.....	81
4.1.3	Qualidade do líquido drenado e lodo do desaguado.....	82
4.1.4	Taxas de Aplicação de Sólidos (TAS).....	83
4.2	COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE LODO.....	84
4.2.1	Preparação das amostras.....	86
4.3	ENSAIOS DE DESAGUAMENTO NO SISTEMA DE LD	89
4.4	ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS E AMOSTRAS DE LODO.....	94
4.4.1	Distribuição granulométrica por atenuação de raios-x (SEDIGRAPH)..	96

4.4.2	Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X – MEV/EDS	97
4.4.3	Difratometria de Raios X (Ensaio de Difração de Raios X).....	99
4.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESAGUAMENTO EM LD	99
4.5.1	Análise individual e combinada dos resultados dos ensaios.....	100
4.5.2	Sistematização dos resultados dos ensaios	101
4.5.2.1	Qualidade dos drenados.....	102
4.5.2.2	Porcentagens drenadas em relação ao volume de lodo aplicado.....	102
4.5.2.3	Vazão nos leitos.....	102
4.5.2.4	Análise descritiva dos resultados.....	103
4.5.2.5	Teste de normalidade dos dados.....	104
4.5.2.6	Correlação entre os parâmetros observados (Correlação de Spearman).....	105
4.5.2.7	Tratamento estatístico dos dados (Regressão Linear)	106
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	108
5.1	ANÁLISE INDIVIDUAL E COMBINADA DAS DRENAGENS AO LONGO DO PERÍODO DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	108
5.1.1	Análise combinada dos resultados das drenagens ao longo dos ensaios	122
5.1.1.1	Influência do teor de sólidos.....	123
5.1.1.2	Influência da altura da camada de lodo.....	125
5.1.1.3	Influência do geotêxtil no desaguamento.....	127
5.1.1.4	Influência dos lodos da primeira e segunda campanha de coleta de amostras nos desaguamentos.....	129
5.2	ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS	131
5.2.1	Influência do tipo de geotêxtil nas drenagens	136

5.2.2	Influência da altura de camada de lodo aplicada	137
5.2.3	Influência do Teor de sólidos	138
5.2.4	Influência da Taxa de Aplicação de Sólidos	139
5.2.5	Influência dos lodos da primeira e segunda campanha de coleta Sólidos	141
5.2.6	Teste de normalidade dos dados	142
5.2.7	Correlação entre os parâmetros observados (Correlação de Spearman)	143
5.3	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS (REGRESSÃO LINEAR)	145
5.3.1	Fim da Drenagem em dias (modelo1).....	147
5.3.2	Porcentagem do Drenado em relação ao volume do Lodo aplicado no Leito (modelo 2).....	149
5.3.3	Porcentagem do drenado com Cor Aparente Inferior a 75 uH (modelo 3)	151
5.3.4	Porcentagem do drenado com Turbidez Inferior a 40 uT (modelo 4) ..	154
5.3.5	Análise crítica das regressões.....	156
5.3.6	Utilização prática do modelo de regressão para estimar o fim das drenagens	157
5.4	QUALIDADE DO LÍQUIDO DECANTADO SOBRE OS LEITOS	160
5.5	TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS DO LODO RETIDO NO LEITO APÓS O TÉRMINO DA DRENAGEM	162
5.6	RESULTADOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LODO E GEOTÊXTEIS	164
5.6.1	Valores de concentração de metais, série de sólidos e Carbono Orgânico Total para os lodos brutos.....	165
5.6.2	Valores dos parâmetros físicos e hidráulicos dos geotêxteis utilizados	167
5.6.3	Análises em amostras de lodo bruto por MEV/EDS.....	168

5.6.4	Análises em amostras dos geotêxteis virgens e após drenagens por MEV/EDS	172
5.6.4.1	Análise das amostras dos geotêxteis novos (sem uso)	172
5.6.4.2	MEV dos geotêxteis após as drenagens.....	177
5.6.5	Análises em amostras de lodo bruto por Difração de Raios X	183
5.6.6	Distribuição de tamanho de partículas nas amostras dos lodos brutos em análise por SEDIGRAPH	186
6	CONCLUSÕES	190
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	194
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	195
9	APÊNDICE	202
9.1	APÊNDICE I - TABELAS	202
A.	APÊNDICE II – HISTOGRAMAS	217
B.	APÊNDICE III – RESULTADOS DOS ENSAIOS	245

1 INTRODUÇÃO

As Estações de Tratamento de Água (ETA) com tecnologia de ciclo completo geram resíduos durante o processo de potabilização de água para abastecimento público, que são: o lodo proveniente dos decantadores ou flutadores e a água de lavagem de filtros (ALAF). Estes resíduos precisam ser removidos, para garantir a eficiência do sistema, e tratados, sendo destinados e/ou dispostos de forma adequada para evitar impactos ambientais.

No Brasil, a universalização do saneamento implica em uma demanda crescente de infraestrutura e estações de tratamento de água e esgoto, conseqüentemente, de resíduos gerados por esses sistemas.

O crescimento populacional, principalmente em áreas urbanas, e o desenvolvimento tecnológico da sociedade acabam exigindo processos de produção mais sofisticados de bens que garantam a sobrevivência. Esse crescimento traz exigências, refletindo nos processos industriais e agropecuários que necessitam uma demanda cada vez maior de água. Essas atividades somadas geram resíduos, entre estes, os líquidos, que, de forma geral, retornam as coleções superficiais de água, provocando decaimento na qualidade da mesma.

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB, 2008), apenas 6% dos municípios brasileiros que geram lodo no processo de tratamento de água destinavam o mesmo para aterro, incineração ou reaproveitamento, o restante dispõe em corpos d'água, terrenos ou outra forma de destinação não especificada. Em 2017, segundo a PNSB, estes valores aumentaram para 30% (sendo 23% para aterro e 7% de reaproveitamento), porém, ainda muito aquém do esperado (PNSB, 2017).

Cordeiro *et al.* (2011) estimam que o volume de resíduos de ETAs gerados no Brasil é em torno de 5% da água produzida. A redução deste volume implica inicialmente na melhoria dos processos e operações realizadas nas ETAs, ou seja, na otimização da coagulação química, no intervalo e operação de remoção de lodo do decantador e até na configuração/projeto destas unidades (decantadores ou

flotadores). Na sequência, requer alternativas de desaguamento ou redução de volume do lodo gerado nas ETAs, visando a destinação ambientalmente adequada.

Estudo elaborado por Achon e Cordeiro (2016), pesquisando a destinação e disposição do lodo em 22 ETAs de uma mesma sub-bacia localizada no Estado de São Paulo, demonstrou que 77% destas lançam este resíduo em corpos d'água, 9% lançam no solo, 14% dispõem em aterros após desaguamento e nenhuma ETA recicla ou reutiliza o lodo.

O lançamento dos resíduos de ETA em corpos d'água infringe a legislação ambiental vigente no país (Leis 9.605/1998 e 9.433/1997). Tais resíduos são classificados como resíduo sólido pela NBR 10.004/2004 e devem estar em consonância com Lei 12.305/2010, que determina a destinação ambientalmente adequada dos resíduos do saneamento, incluindo o lodo de ETA, priorizando a redução, reuso e reciclagem.

Apesar de ser classificado como um resíduo sólido, o lodo de ETA é bastante diluído, com alto teor de umidade, variando de 95 a 99% de umidade, dependendo de vários fatores, tais como: qualidade da água bruta, tecnologia de tratamento de água adotada, produtos químicos utilizados, formas de remoção do lodo, tempo de acúmulo do lodo nas unidades, configuração/projetos dessas unidades, entre outros. Assim, para que seja viável e factível o reuso ou reciclagem deste resíduo é necessário que antes este seja destinado a um sistema de desaguamento natural ou mecânico.

O desaguamento ou remoção de parcela de água do lodo bruto, que contém cerca de 1 a 5% de teor de sólidos totais, tem como objetivo a redução do volume, gerando massa ou lodo desaguado com maior concentração de sólidos, elevando o teor de sólidos totais para valores acima de 20 a 25%, dependendo do sistema de desaguamento adotado, buscando viabilizar a reutilização da água drenada, que pode ser realizada na própria ETA e a destinação ou disposição final do lodo desaguado.

Ressalta-se que a destinação busca englobar, além dos aspectos logísticos, a adequação do resíduo às necessidades do receptor, que poderá promover o seu uso benéfico, viabilizando diversas formas de reuso ou reciclagem, seja no setor ceramista, como agregado miúdo na elaboração de concreto, seja como camada de

cobertura em aterros sanitários, na pavimentação ou outros usos ambientalmente adequados.

A definição do tipo de sistema de desaguamento a ser utilizado depende de vários fatores, podendo ser citados: intervalo e operação de remoção do lodo na estação, área necessária para implantação (disponibilidade e custo), custos de implantação (equipamentos necessários), operação do sistema, necessidade de energia elétrica e produtos químicos, condições climáticas, eficiência na redução de volume ou aumento do teor de sólidos totais do lodo desaguado, distância da estação ao destino ou disposição final, entre outros fatores.

Os sistemas naturais de desaguamento de lodo normalmente são sistemas abertos, com exceção dos BAGs ou SCR (Sistema Confinado de Resíduos). Estes sistemas naturais caracterizam-se pelo baixo consumo de energia elétrica e produtos químicos, que podem ser praticamente nulos dependendo do sistema adotado. Já os sistemas mecânicos são sistemas fechados que necessariamente usam energia elétrica e produtos químicos. Ressalta-se que os sistemas naturais abertos possuem ainda a vantagem de reduzir o volume do lodo após a fase de desaguamento, através da secagem natural (por evaporação), possuindo como desvantagem a necessidade de maior área disponível.

Dentre os sistemas naturais, o Leito de Drenagem, proposto inicialmente por Cordeiro (2001), tem se mostrado promissor em promover o desaguamento de resíduos de ETA em locais com área disponível e clima adequado, especialmente em países de clima tropical. Ressalta-se que o uso de cobertura nos LDs permite ampliar sua aplicação em regiões com elevados índices pluviométricos, pois melhora a fase de secagem do lodo, como pesquisado por Reis (2011).

Trabalhos sobre Leitões de Drenagem (LD) em escala piloto e protótipos em escala real como os estudos realizados por Achon e Cordeiro (2003; 2004), Fontana (2004), Barroso (2007), Reis (2011), Cordeiro *et al.*(2014) e Lustosa *et. al* (2017), indicaram a viabilidade de aplicação do Leito de Drenagem com uso de geotêxteis não tecidos.

Os principais aspectos positivos são a boa eficiência na redução de volume, mesmo sem a utilização de condicionamento químico, baixo custo de implantação e operação, simplicidade operacional e necessidade de mão de obra pouco especializada para operação. Vale ressaltar que, por ser um sistema aberto, o LD engloba as fases de drenagem e secagem por evaporação, potencializando a redução de volume e atingindo valores superiores aos sistemas mecânicos e fechados, que limitam o teor de sólidos totais finais.

Cordeiro *et al.* (2014) indicaram o potencial de emprego do desaguamento por LD em ETAs que atendem populações de até 20.000 habitantes, sendo que esse porte populacional representa a maioria dos 5570 municípios brasileiros, o que significa um cenário promissor e oportuno para os LDs, que podem ser projetados para resolver o passivo ambiental causado por estas ETAs. No entanto, a indicação e dimensionamento adequado do sistema em LD, ainda carecem de estudos.

Segundo Santos *et al.* (2014), apesar dos diversos trabalhos já realizados sobre o tema, os conhecimentos ainda são insuficientes para caracterizar perfeitamente a tecnologia do LD, destacando a importância do desenvolvimento de mais estudos, visto que o lodo, tanto de ETA quanto de ETE, é produzido em milhares de toneladas diárias e deve ser corretamente disposto na natureza.

Segundo Fontana (2004) e Achon *et al.* (2008), no projeto e implantação de Leitões de Drenagem para desaguamento de lodo devem ser considerados variáveis como: espaço territorial, disponibilidade financeira, clima e outras variáveis dependentes das características e exigências do lodo e do sistema de LD. Algumas destas variáveis (fatores) devem ser avaliadas em escala laboratorial antes da implantação, principalmente relacionadas às características do lodo bruto gerado nas ETAs e as configurações do próprio sistema de desaguamento por LD.

A maioria das pesquisas já realizadas com Leitões de Drenagem, em escala laboratorial ou piloto, foi feita em situações não controladas, ou seja, usando o lodo bruto da forma como este foi coletado nos decantadores das estações de tratamento de água. Aliado a este fator, a maioria das pesquisas usou o mesmo tipo de geotêxtil, o tecido de gramatura ou massa por unidade de área de 600 g.m^{-2} , sem caracterizar

ou analisar de forma mais aprofundada o tipo e material do geotêxtil e as diferentes cargas hidráulicas aplicadas (altura da camada de lodo).

Assim, nesta pesquisa foi proposto o desenvolvimento e montagem de LD em escala de bancada, com o objetivo de estudar a etapa de drenagem da água livre no desaguamento de lodo de ETA em situações controladas e diversas, visando contribuir com o avanço científico nesta temática e, particularmente, com a influência de diferentes condições e parâmetros na eficiência do desaguamento.

Ressalta-se que a análise de diferentes fatores no desaguamento de lodo de ETA em LD é uma condição ainda não explorada na literatura científica, além da necessidade de incluir a análise combinada e mais aprofundada de diferentes geotêxteis, diferentes teores de sólidos do lodo bruto e alturas da camada de lodo em um mesmo estudo. Esta pesquisa poderá somar-se aos estudos já realizados, contribuindo com resultados de ensaios controlados e análise de múltiplos fatores no meio científico e prático.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a influência de múltiplos fatores no desaguamento de lodo de ETA em Leitões de Drenagem (LD), em situação controlada e variando o geotêxtil utilizado, considerando a etapa de drenagem de água livre.

Os objetivos específicos são:

- Analisar os mecanismos envolvidos na drenagem de água livre do lodo de ETA em LD;
- Analisar diferentes condições iniciais do sistema de LD para desaguamento de lodo de ETA e sua influência no processo de drenagem, variando o tipo de geotêxtil; o teor de sólidos totais do lodo bruto (%ST); a altura da camada de lodo e a Taxa de aplicação de sólidos (TAS);
- Analisar a eficiência da drenagem através de parâmetros qualitativos e quantitativos do líquido drenado e do sólido retido no LD, incluindo a taxa de vazão dos drenados; porcentagem drenada em relação ao volume de lodo aplicado; volume drenado por área do leito; qualidade do líquido drenado e decantado (sobrenadante); teor de sólidos totais do lodo desaguado (retido nos leitões) e a duração da fase de drenagem;
- Analisar a caracterização do lodo e dos geotêxtis utilizados nesta pesquisa e as possíveis influências no processo de desaguamento em LD.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE A ÁGUA DE ABASTECIMENTO

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (SHIKLOMANOV, 1998 apud BRASIL, 2009, p.42), o Brasil possui aproximadamente 12% das reservas mundiais de água doce do planeta. Apesar disso, a crise hídrica ocasionada pela falta de água nos mananciais superficiais destinados à captação tornou-se mais grave a partir do ano de 2014, sobretudo na região sudeste do país. A escassez evidenciada pela crise expôs a fragilidade do setor, principalmente quanto aos índices de desperdício de água tratada.

As perdas de água tratada advêm de várias causas. No processo de abastecimento de água por meio de redes de distribuição podem acontecer perdas devido ao vazamento de água tratada nessas redes, assim como em razão de furtos de água através de ligações clandestinas ou adulterações de hidrômetros. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento de 2019, as perdas de água na distribuição são da ordem de 39,2% no Brasil (BRASIL, 2020).

Além das perdas de água na distribuição, destaca-se o uso e desperdício de água durante os processos de potabilização. Cerca de 4% do total da água tratada nas estações de tratamento são utilizados dentro da própria ETA, essa água é utilizada na lavagem de filtros, decantadores, floculadores e outros equipamentos que compõem o sistema de tratamento. Essa água de lavagem é revertida em resíduo, junto com os lodos dos decantadores/flotadores. Cordeiro *et al.* (2011) relata o volume de resíduos de ETAs gerados atualmente no Brasil, e o estima em torno de 5% do total de água produzida. Richter (2001) cita que esse lodo é basicamente líquido, com teor de sólidos variando entre 0,1 a 4% na água de descarga dos decantadores, e entre 0,004 a 0,1% para água de lavagem dos filtros.

A diminuição de perdas de água na distribuição requer medidas que vão desde a manutenção adequada de redes de distribuição até a conscientização da população quanto ao uso desse recurso finito. A redução no desperdício de água nas ETAs passa pela adoção de técnicas de segregação da parte líquida da sólida dos resíduos, o que

possibilitaria a reinserção da água drenada de volta à cadeia de produção de água potável. Estudo realizado por Campos (2014) indica a viabilidade na recirculação da água de lavagem de filtros. No entanto, mais estudos ainda precisam ser feitos com a finalidade de reaproveitamento dessa água com segurança.

Mananciais são reservas hídricas ou fontes utilizadas no abastecimento de água. Podem ser classificados em manancial superficial e subterrâneo. Quanto às águas superficiais, no Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA, publicou a Resolução nº 357/2005, que as classifica em doces, salobras e salinas, ordenando-as em função das características física, química e biológica da água dos mananciais, tornando obrigatória a determinação de dezenas de parâmetros para caracterizar as águas e assegurar seus usos predominantes. A determinação destes parâmetros tem sido sistematicamente descumprida devido à falta de recursos humanos, materiais e financeiros em muitos órgãos federais, estaduais e municipais que poderiam exercer esta atividade.

A qualidade da água começa na sua origem, no uso e ocupação do solo da bacia de contribuição e nas medidas de proteção dos mananciais. No caso de água destinada ao consumo humano, a proteção dos mananciais é a primeira linha de defesa do chamado princípio de múltiplas barreiras, pelo qual procura-se alcançar alto grau de segurança na qualidade da água distribuída à população, através da vigilância e controle das diversas etapas que compõem o sistema de abastecimento (HELLER; PÁDUA, 2010). Historicamente, grandes acidentes com água potável tiveram sua origem no manancial, como a tragédia da hemodiálise de Caruaru, em Pernambuco, onde 71 pessoas morreram devido à contaminação da água utilizada na hemodiálise, no ano de 1996 (AUGUSTO *et al.*, 2012).

O crescimento populacional e a disponibilidade de água são inversamente proporcionais e, por isso, o aproveitamento máximo da bacia pela diversidade dos usos 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 apenas aos aspectos físicos, seguido de desinfecção e, muitas vezes, não eliminando os

contaminantes químicos a exemplo de metais, hormônios e agrotóxicos (BRASIL, 1997; AUGUSTO *et al.*, 2012).

A água a ser distribuída para a população deve atender ao padrão de potabilidade para consumo humano estabelecido pela Portaria de consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017 (BRASIL, 2017). Com o aumento das concentrações de partículas nos mananciais superficiais, os sistemas de tratamento têm a necessidade de remover partículas suspensas e dissolvidas cada vez mais diversas e complexas, exigindo técnicas e tecnologias mais avançadas e gerando resíduos com as mais variadas características. No Brasil, a grande maioria das estações não trata esses resíduos, lançando-os em corpos d'água (ACHON; CORDEIRO, 2013), desrespeitando a legislação ambiental vigente. Apesar disso, os rios, que são os principais fornecedores de água para o abastecimento público, também são receptores de todo e qualquer tipo de resíduo, gerado muitas vezes pelo próprio sistema de tratamento de água, interferindo de forma negativa no meio ambiente. Outro ponto negativo, além da degradação ambiental, é que a disposição dos resíduos dessa maneira influencia na qualidade do tratamento para ETAs que estarão à jusante, do ponto de descarte do lodo. A recuperação dos mananciais facilitaria todo o processo de potabilização da água.

3.1.1 Considerações sobre os parâmetros físicos, químicos e biológicos da água para abastecimento público

O excesso de partículas e impurezas na água pode causar sérios danos à saúde humana e impactar negativamente em suas atividades econômicas. Deste modo, é indispensável que se faça as caracterizações física, química e biológica da água, a fim de indicar a qualidade do manancial que abastece a Estação de Tratamento de água (ETA) e usar estes dados para gestão do tratamento, incluindo o lodo gerado.

Pode-se definir como água potável aquela que pode ser consumida sem riscos à saúde humana e sem que haja rejeição ao consumo por questões organolépticas.

No Brasil, os padrões de potabilidade da água foram inicialmente estabelecidos pela Portaria n° 56/Bsb de 14/03/1977. Esta foi revogada pela Portaria n° 36 e revisada pela Portaria n° 310/2000, quando foi promulgada a Portaria n° 1.469. Em 25/03/2004, esta Portaria foi praticamente reeditada e denominada Portaria n° 518/2004, que posteriormente foi atualizada na Portaria n°2914/2011, e atualmente tais padrões estão estabelecidos na portaria de consolidação n°5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017).

Os padrões de potabilidades brasileiros são compostos por: padrão microbiológico; padrão para substâncias químicas que representam riscos à saúde (inorgânicas, orgânicas, agrotóxicos, desinfetantes e produtos secundários da desinfecção); padrão de radioatividade; padrão de cianotoxinas e padrão organoléptico, que são as características da água que podem ser percebidas pelos sentidos humanos, como cor, odor, sabor e textura.

Para o padrão de turbidez da água pós-filtração ou pré-desinfecção, deve apresentar um máximo de 1,0 uT (unidades de Turbidez) em 95% das amostras para águas subterrâneas tratadas com desinfecção e para filtração lenta. Para águas tratadas com filtração rápida o valor máximo permitido de turbidez é de 0,5 uT (BRASIL, 2017).

Os índices para aceitação do consumo humano são estabelecidos como os padrões organolépticos, que determinam o limiar da percepção humana de gosto e odor, que acontece em concentrações inferiores às que são critérios para a saúde. Dentre eles, estão a concentração de produtos como: alumínio (0,2 mg/L), cloreto (250 mg/L), ferro (0,3 mg/L), sódio (200 mg/L) e zinco (5mg/L). Também são levados em conta as características de cor aparente (15 uH), dureza total (500 mg/L), gosto e odor (intensidade 6) e turbidez (5 uT). Estes e outros valores para outras substâncias e características estão no Anexo 10 do Anexo XX da Portaria n°5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017).

A turbidez pode ser definida como uma medida do grau de interferência à passagem da luz através do líquido, que expressa, de modo simplificado, a transparência de um líquido, e é causada principalmente por areia fina, argila e

microrganismos. Ao contrário da cor, que resulta de substâncias dissolvidas, portanto com dimensões inferiores a 1,2 μm , a turbidez é provocada por partículas em suspensão, sendo, por sua vez, reduzida por sedimentação.

Lira (2014) cita que a cor de uma substância é produzida pela reflexão da luz em partículas coloidais, com dimensões inferior a 1,2 μm , finamente dispersas, de origem orgânica (ácidos húmicos e fúlvicos) ou mineral (resíduos industriais, compostos de ferro e manganês).

Embora a medição dos parâmetros de cor e turbidez para lodos muito concentrados não faça sentido segundo (Cordeiro 2001), a mensuração destes parâmetros é fundamental quando se observa a qualidade da água e, por conseguinte, estes parâmetros são medidos no percolado produzido pelo desaguamento do lodo.

Lira (2014) menciona que o potencial hidrogênioônico (pH) representa a intensidade das condições ácidas ou alcalinas do meio líquido, por meio da medição da presença de íons hidrogênio (H^+). O valor do pH influi na distribuição das formas livre e ionizada de diversos compostos químicos, além de contribuir para um maior ou menor grau de solubilidade das substâncias e de definir o potencial de toxicidade de vários elementos. o pH é um parâmetro importante para a disposição do lodo de ETA, principalmente quando considerada sua utilização na agricultura ou sua disposição em aterros sanitários ou industriais (MONTALVAN, 2016). Sendo este parâmetro com faixas bem definidas na legislação sobre água potável (pH entre 6 a 9,5) e lançamento de efluentes (pH entre 5 a 9), a medição deste parâmetro para o percolado do lodo também se faz necessária.

3.1.2 Legislação aplicada as ETAs e aos resíduos gerados

A maioria das Estações de Tratamento de Água (ETAs) operando no Brasil foi implantada antes da Lei 9.433/1997, Lei 9.605/1998 e Resolução do CONAMA nº 237/1997, que exige o licenciamento ambiental das atividades potencialmente poluidoras. Portanto, raramente o sistema de destinação e disposição do final do lodo gerado nas ETAs eram contemplados nos projetos das estações, sendo atualmente

exigência legal para novos projetos e ampliações. Assim, tem-se observado que a grande maioria das estações não trata esses resíduos, lançando-os em corpos d'água (ACHON; CORDEIRO, 2013), desrespeitando a legislação ambiental vigente. Com isso, os rios, que são os principais fornecedores de água para o abastecimento público, também são receptores de todo e qualquer tipo de resíduo, gerado, muitas vezes, pelo próprio sistema de tratamento de água, interferindo de forma negativa no meio ambiente.

A Política Nacional de Recursos Hídricos - Lei 9.433/97 estabelece que o lançamento de resíduos líquidos, sólidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final em corpos d'água, além de outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água, está sujeita à outorga do Poder Público. (BRASIL, 1997).

O lançamento dos resíduos, gerados em Estações de Tratamento de Água em corpos d'água é considerado crime ambiental, devido aos efeitos diretos causados ao ambiente aquático do corpo receptor, provocando danos à fauna aquática. Constitui-se crime ambiental conforme Seção III, artigo 54º, da Lei 9.605/98 (BRASIL, 1998).

No campo normativo destaca-se as Resoluções nº 357 e nº 430 do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, e o decreto paulista nº 8.468 de setembro de 1976, que têm por objeto o estabelecimento de classes de enquadramento dos corpos d'água, bem como nortear o controle dos efluentes líquidos. O Artigo 3º da Resolução CONAMA Nº430/2011 dispõe que

os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis (BRASIL, 2011, p.27).

Assim, os gerentes de sistemas que lançam resíduos *in natura* nos corpos d'água devem iniciar ações que permitam avaliar a forma de geração e destino desses resíduos, além de definir estratégias para essa solução.

Diante desse cenário, o Brasil enfrenta um grande desafio na gestão destes resíduos. A disposição do lodo de ETAs brasileiras ainda representa um sério

problema. Na prática, a maioria do lodo é lançado em corpos receptores sem nenhum tipo de tratamento prévio, infringindo a legislação ambiental vigente no país (Lei 9.605/1998 e 9.433/1997) (CORDEIRO *et al.*, 2012).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas no Brasil possui uma norma de classificação para os resíduos sólidos (NBR 10.004:2004) que inclui em sua definição de resíduos sólidos os “lodos provenientes de sistemas de tratamento de água [...] bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água [...]” (ABNT, 2004, p. 1). Além disso, a lei paulista nº 123600/2006, que institui a política paulista de resíduos sólidos, enquadra 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.

Portanto, os resíduos gerados em ETAs são classificados como resíduos sólidos, sendo assim, devem estar em consonância com os preceitos da Lei 12.305/2010 e da série de normas NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, Lei 12.305/2010, conceitua e diferencia resíduos e rejeitos, em seu art. 3º, incisos XV e XVI. Neste âmbito, a Lei 12.305/2010 também define e diferencia destinação e disposição final (BRASIL, 2010). Desse modo, os resíduos sólidos gerados nas ETAs devem ter destinação ambientalmente adequada e apenas os rejeitos devem ser encaminhados para disposição final em aterros, que são resíduos sólidos que esgotaram todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis.

Assim, os lodos gerados em ETAs são classificados como resíduos sólidos e, portanto, devem ter destinação ambientalmente adequada, priorizando a redução, reuso e reciclagem, de acordo com a Lei 12305/2010. Sendo assim, os sistemas de desaguamento além de permitirem o reuso e reciclagem do lodo, reduzem seu volume, vindo ao encontro da Lei 12.3505/2010, que prevê como primeira ordem de prioridade para os resíduos a redução.

3.2 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA CONVENCIONAIS DE CICLO COMPLETO

A qualidade da água bruta é um dos principais aspectos a ser levado em consideração na seleção da técnica de tratamento de água a ser utilizada, sendo que águas com mais impurezas são mais indicadas para ETAs de ciclo completo que para ETAs de filtração lenta ou direta. A NBR 12.216 (ABNT, 1992) tem os parâmetros de DBO, coliformes totais, pH, cloretos e fluoretos para cada tipo de água e segundo essa norma, os tipos de água são:

- Água tipo A: águas superficiais ou subterrâneas provenientes de bacias sanitariamente protegidas e que atendem ao padrão de potabilidade, sendo requeridas apenas desinfecção e correção de pH;

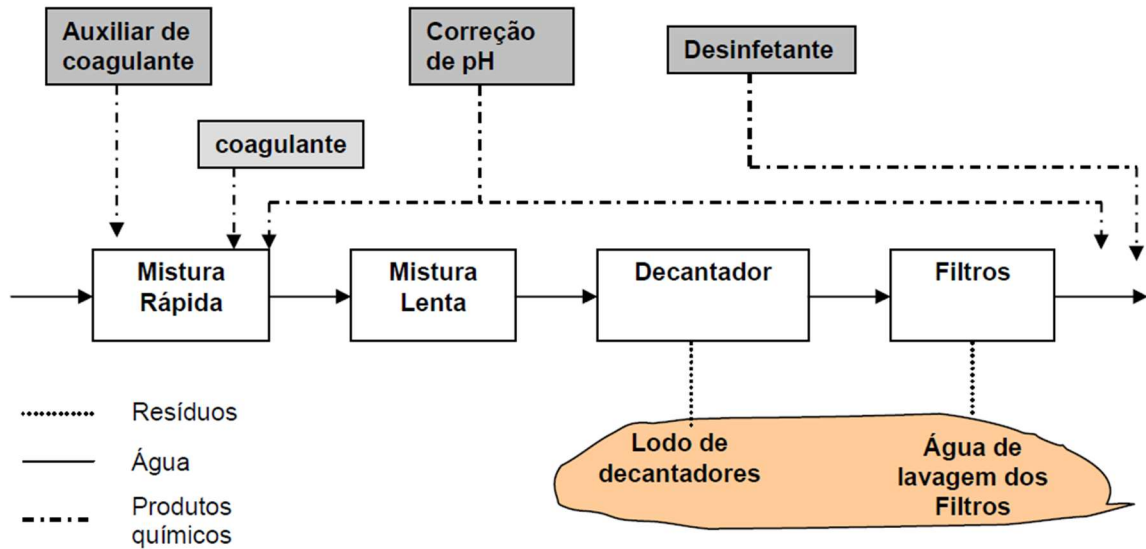
- Água tipo B: águas superficiais ou subterrâneas provenientes de bacias não protegidas e que atendem ao padrão de potabilidade, por meio de tecnologia de tratamento que não exija coagulação química;

- Água tipo C: águas superficiais provenientes de bacias não protegidas e que exijam tecnologias com coagulação, para atender ao padrão de potabilidade;

- Água tipo D: águas superficiais de bacias não protegidas, sujeitas à poluição, e que requerem tratamentos especiais, para atender ao padrão de potabilidade.

No Brasil, segundo o IBGE/PNSB (2010), cerca de 70% da água tratada e distribuída eram provenientes de ETAs de ciclo completo. Na figura 3.1 pode-se observar o conjunto de operações utilizadas em uma ETA de ciclo completo no processo de potabilização da água, que foi adaptada da imagem original para incluir os resíduos gerados nas unidades de decantação (lodo) e filtração (água de lavagem dos filtros).

Figura 3.1 - Ilustração de uma ETA convencional e locais de geração de resíduos



Fonte: Barroso (2007).

As ETAs com tecnologia de ciclo completo sempre englobam, após a coagulação e floculação, a decantação, enviando para os filtros apenas as partículas não removidas nos decantadores. Como os processos de tratamento ocorrem em unidades dispostas em série, o baixo desempenho de uma unidade influi nas etapas à jusante. Logo, o sistema da ETA deve ser analisado como um todo. As águas brutas das ETAs, que utilizam tratamento convencional de ciclo completo, podem ter maiores concentrações de material dissolvido ou em suspensão comparados com os métodos da filtração lenta e da filtração direta. Quando os flocos formados no tratamento da água têm baixa velocidade de assentamento, os decantadores podem não ser ideais para a retenção das impurezas, o que pode sobrecarregar os filtros. Em uma situação assim o mais adequado pode ser a substituição de uma unidade de decantação por uma unidade de flotação (HELLER; PÁDUA, 2010). A combinação de processos e operações unitárias originam ao que se denomina técnicas de tratamento de água. Para as ETAs de ciclo completo, as principais operações unitárias estão brevemente descritas nos itens a seguir:

- Coagulação: ocorre a partir da dispersão do coagulante através da mistura rápida, cujo resultado é a desestabilização das partículas (colóides) presentes na

água bruta, a desestabilização promove a neutralização das cargas negativas das partículas, que tendiam a se repelir antes do processo. A adição do coagulante pode alterar o valor de pH, o que demanda sua correção.

- **Floculação:** ocorre com a movimentação da água já coagulada dentro dos tanques com gradientes de velocidade previamente definidos (mistura lenta), fazendo com que as partículas, agora com cargas neutras, possam se aglutinar, ocasionando na formação de flocos mais densos e volumosos.

- **Decantação ou sedimentação:** devido à formação dos flocos, nesta etapa ocorre a sedimentação destes para o fundo dos tanques.

- **Flotação:** em linhas gerais, consiste no processo inverso ao da decantação. Certos flocos podem manifestar baixa velocidade de sedimentação, inviabilizando tal procedimento. Geralmente, para melhorar o rendimento do processo de flotação, agregam-se aos flocos microbolhas de ar que aumentam a força de empuxo sobre os mesmos, facilitando sua ascensão.

- **Filtração:** ainda com impurezas não sedimentadas, nos filtros a água passa por camadas de areia ou areia e antracito suportadas por cascalho de diversas dimensões, cujo objetivo é a retenção das partículas ou sólidos ainda presentes.

- **Desinfecção:** A desinfecção da água nas ETAs atua de maneira corretiva e preventiva, eliminando organismos patogênicos e mantendo um valor residual de desinfetante na água para atuar preventivamente no caso de contaminação na rede de distribuição. O gás cloro é o desinfetante mais empregado em ETAs brasileiras (HELLER; PÁDUA, 2010).

- **Correção de pH:** o objetivo principal da correção de pH é a proteção das canalizações das redes e das casas contra corrosão ou incrustação, o que geralmente ocorre pela adição de cal.

- **Fluoretação:** consiste na aplicação de uma dosagem de composto de flúor (ácido fluossilícico), que reduz a incidência da cárie dentária, especialmente no período de formação dos dentes. Esta etapa é realizada em atendimento à uma das exigências do Ministério da Saúde.

3.3 LODO GERADO EM ETA: ASPECTOS GERAIS

O processo de potabilização da água realizado pelas ETAs pode ser entendido como o funcionamento de uma indústria genérica, onde a água bruta é a matéria-prima, que após passar por uma série de operações unitárias para a remoção de resíduos, se torna água potável.

Em ETAs do tipo convencional de ciclo completo, conforme ilustrado na Figura 3.1, a maior quantidade de resíduos são os lodos provenientes dos decantadores e a água de lavagem dos filtros (ALAF). Segundo (DI BERNARDO e DANTAS, 2005), a ALAF supera em termos volumétricos os lodos provenientes dos decantadores, mas conforme observado em Barroso e Cordeiro (2001), a quantidade de sólidos presentes no lodo dos decantadores supera em até 500 vezes a quantidade de sólidos da ALAF.

A diferença de concentração de sólidos entre lodos provenientes dos decantadores e ALAF pode ser justificada por questões operacionais das ETAs, onde, segundo Di Bernardo e Dantas (2005), geralmente a lavagem dos filtros é realizada em intervalos de 12 a 48 horas, com duração de 4 a 15 minutos e possuem uma concentração 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%, segundo Di Bernardo e Centurione Filho (2002), e a concentração de sólidos para lodos provenientes de decantadores de alta taxa ou convencionais com equipamentos de extração de lodo que realizam descargas diárias fica em torno de 0,1 a 1%.

De acordo com Fontana (2004) e Reali (1999), a concentração de sólidos pode variar bastante de um sistema para o outro, podendo alcançar valores de até 3%. Barroso (2007) atribui a variação de concentração de sólidos nos resíduos de decantadores a vários fatores, tais como:

- 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.

A composição dos lodos gerados em ETAs varia em função das características da água bruta, do seu sistema de tratamento e dos produtos e procedimentos utilizados no tratamento (SANTOS, 2012).

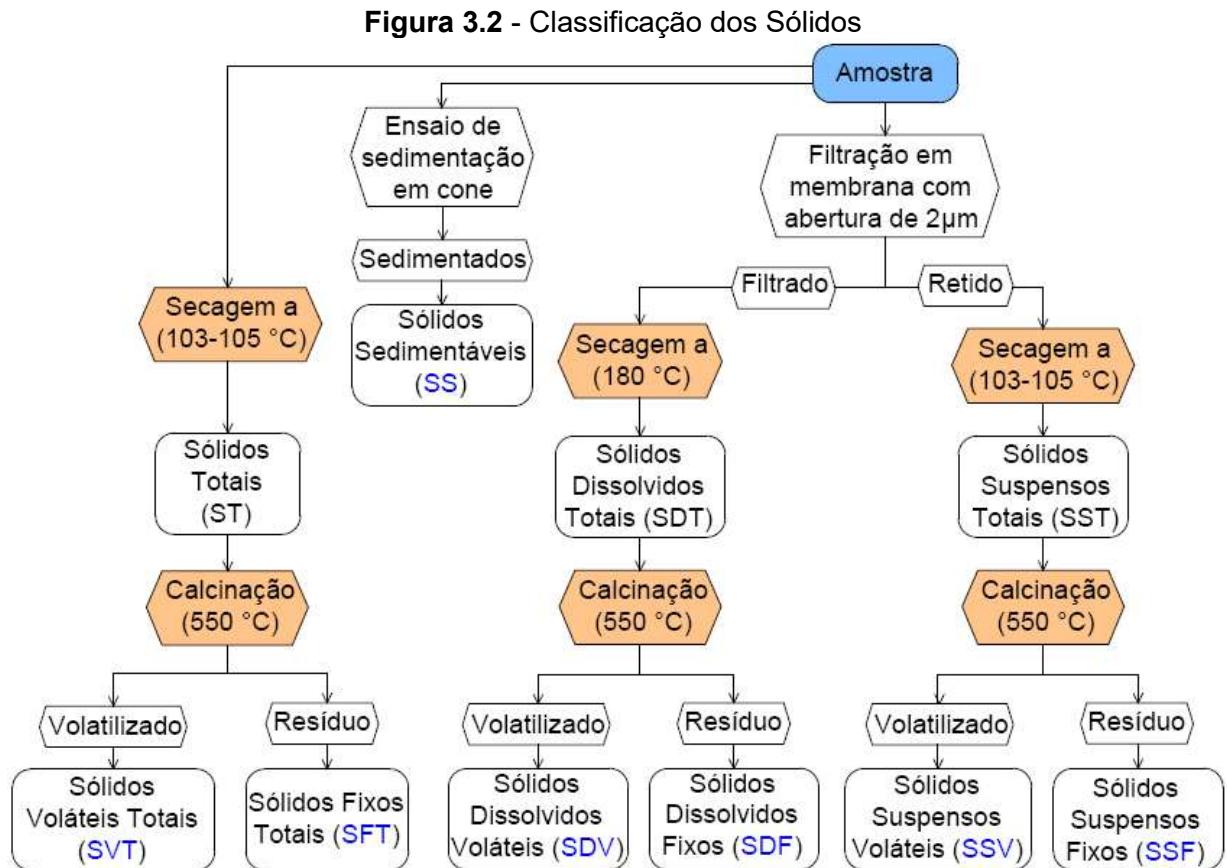
Dependendo das características da água bruta, a quantidade de materiais orgânicos e inorgânicos pode variar no lodo, sendo a maior parcela material inorgânico, composta por areia, silte, argila e reagentes químicos utilizados no tratamento, como sais de alumínio ou de ferro, e a menor parte por elementos inorgânicos como plânctons, bactérias, vírus, protozoários entre outros (Di BERNARDO et. al., 2002).

Por serem basicamente colóides, os quais conferem cor e turbidez à água, as partículas que se encontram na água bruta são de difícil remoção, uma vez que seus tamanhos predominantes são da ordem de 1 nm a 1µm (CORDEIRO, 2001).

A caracterização física e química é fundamental na avaliação ambiental de qualquer tipo de resíduo. Isto posto, os principais parâmetros que avaliam as características físicas e químicas dos resíduos de ETA são: teor sólidos (orgânicos e inorgânicos), Turbidez, Cor, pH, metais, Demanda Química de Oxigênio (DQO), entre outros.

Os sólidos totais (ST) são definidos segundo APHA/AWWA/WEF (2001), o material restante em um recipiente após a evaporação de uma amostra e sua posterior secagem em estufa à temperatura definida. Sólidos totais incluem Sólidos suspensos 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. A Na figura 3.2 pode-se observar outras classificações para os sólidos.



Fonte: Adaptado de APHA/AWWA/WEF (2001).

Na Tabela 3.1 pode ser observada a série de sólidos dos lodos utilizados por Fontana (2004) em sua pesquisa. A Tabela expressa os valores em concentração de sólidos, ou seja, unidade de massa por unidade de volume, sendo que também pode-se indicar a quantidade de sólidos em uma mostra através do teor de sólidos, ou seja, unidade de massa sobre unidade de massa e normalmente expressa em porcentagem. Pode-se notar ainda algumas diferenças entre os lodos coletados no mesmo decantador, com diferença de menos de 1 mês.

Tabela 3.1 - Série de sólidos dos lodos utilizados por Fontana (2004)

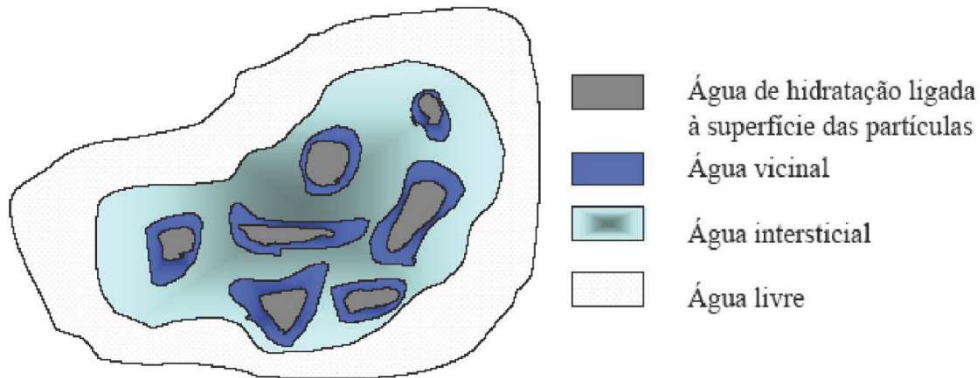
Parâmetro	Lodo do decantador	
	16/12/2003	06/01/2004
Sólido sedimentável (mg/L)	860	850
Sólido total (mg/L)	98397	28263
Sólido fixo (mg/L)	30368	20032
Sólido Volátil (mg/L)	68029	8231
Sólido suspenso total (mg/L)	25150	28400
Sólido suspenso fixo (mg/L)	1200	5350
Sólido suspenso volátil (mg/L)	23950	23050

Fonte: Adaptado de Fontana (2004).

O lodo é composto por fase sólida e líquida, sendo que a maior parcela desse resíduo corresponde à fase líquida. Barroso (2007) cita o modelo proposto por Vesilind e Hsu (1997) e Smollen e Kafaar (1994), que procura definir as frações de água presente no lodo, sendo que os diferentes estados físicos da água presente no lodo podem ser observados na figura 3.2:

- Água livre – água não associada aos sólidos e que pode ser 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 das mesmas.

Figura 3.3 - Frações de água constituintes dos lodos de ETAs



Fonte: Barroso (2007).

Barroso (2007) estudou as micro e macropropriedades dos lodos de ETA que podem impactar em seu desaguamento por LD, e aborda alguns conceitos importantes para entender os mecanismos envolvidos no processo de drenagem que serão brevemente discutidos a seguir:

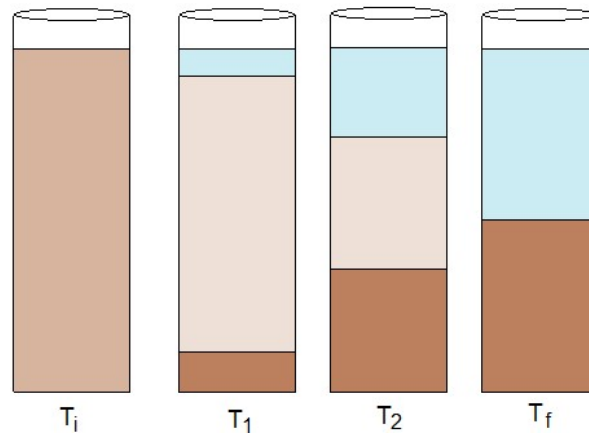
- **Sedimentabilidade**

Em geral, são definidos três tipos de sedimentação em suspensões como no caso de lodos de ETAs: discreta, floculenta e sazonal. A sedimentação discreta ocorre normalmente em lodos com baixa concentração de sólidos. Já a sedimentação floculenta e sazonal ocorre devido a grandes concentrações de sólidos na suspensão e a propriedades físicas semelhantes das partículas.

Na figura 3.3 apresenta-se, de maneira simplificada, a evolução da sedimentação do tipo sazonal reportada por Santos, Barbosa Filho e Giordano (2005), no instante T_i o lodo está presente em toda a altura do recipiente, nos instantes T_1 e T_2 , à medida que os sólidos vão sedimentando no fundo, aumenta a concentração de sólidos nas camadas inferiores e a conseguinte redução da velocidade de sedimentação até tornar-se nula, e, ao mesmo tempo, atinge a concentração máxima de sólidos no fundo ($ST_{máx}$) usualmente denominada por torta ou “cake”. No topo, há o aparecimento 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, e em T_f a concentração de sólidos máxima ($ST_{m\acute{a}x}$) 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.

Figura 3.4 - Evolução da sedimentação do tipo sazonal



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Os mecanismos supracitados podem ser observados durante a realização de ensaios em coluna de sedimentação. Contudo, para o caso particular dos leitos de drenagens, ocorre a retirada ou drenagem de água a partir das camadas de fundo, concomitante a sedimentação (BARROSO, 2007).

- **Compressibilidade**

Richter (2001) pontua que na filtração de lodos em leitos de drenagem / 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 se desenvolve, aumenta a resistência à passagem do fluido. A resistência específica 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.

A característica de deformação do floco durante o desaguamento pela aplicação de pressão é definida como compressão. A principal consequência da

compressão (deformação dos flocos) é o decréscimo da taxa de desaguamento com o aumento da pressão aplicada (BARROSO,2007).

- **Viscosidade**

Aplica-se a reologia ao estudo da deformação e ao transporte dos lodos, particularmente na alimentação por bombeamento de filtros prensa, decantadores centrífugos ou qualquer outra necessidade de transporte em condutos forçados. Gates e McDermott (1968) citam que o lodo de ETA, a partir de uma determinada concentração, é um fluido não-Newtoniano e, sendo assim, sua viscosidade é referida como “viscosidade aparente”, pois varia com a concentração de sólidos. 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 da concentração 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, superdimensionando a bomba. Velocidades menores e diâmetros maiores podem não reduzir as perdas de carga da tubulação (RICHTER, 2001).

3.4 DESTINAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS DE ETAS

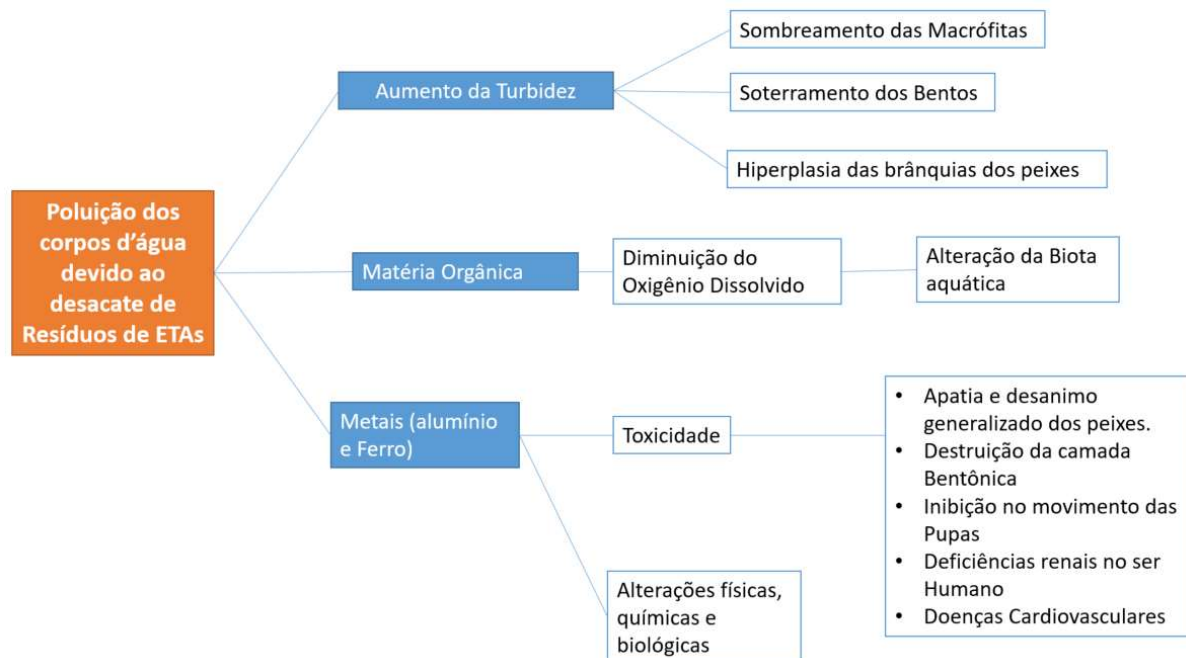
A disposição do lodo de ETAs brasileiras atualmente representa um sério problema. Na prática, a maioria do lodo é lançado em corpos receptores sem nenhum tipo de tratamento prévio, infringindo a legislação ambiental vigente no país (Lei 9.605/1998 e 9.433/1997) (ABNT, 2012).

Achon e Cordeiro (2016) apresentam dados sobre a destinação e disposição final de resíduos de 22 ETAs de uma mesma sub-bacia localizada no estado de São Paulo, onde verifica-se que 77% lançam o lodo nos corpos receptores sem tratamento prévio e o lodo desaguado, proveniente das ETAs que possuem tratamento para o

lodo , 14% é disposto em aterro, 9% disposto de forma inadequada e nenhuma ETA faz reuso ou reciclagem do lodo.

O impacto do lançamento desse resíduo em corpos d'água foi relatado por Achon *et al.* (2005). Uma síntese desses impactos pode ser observada na figura 3.4.

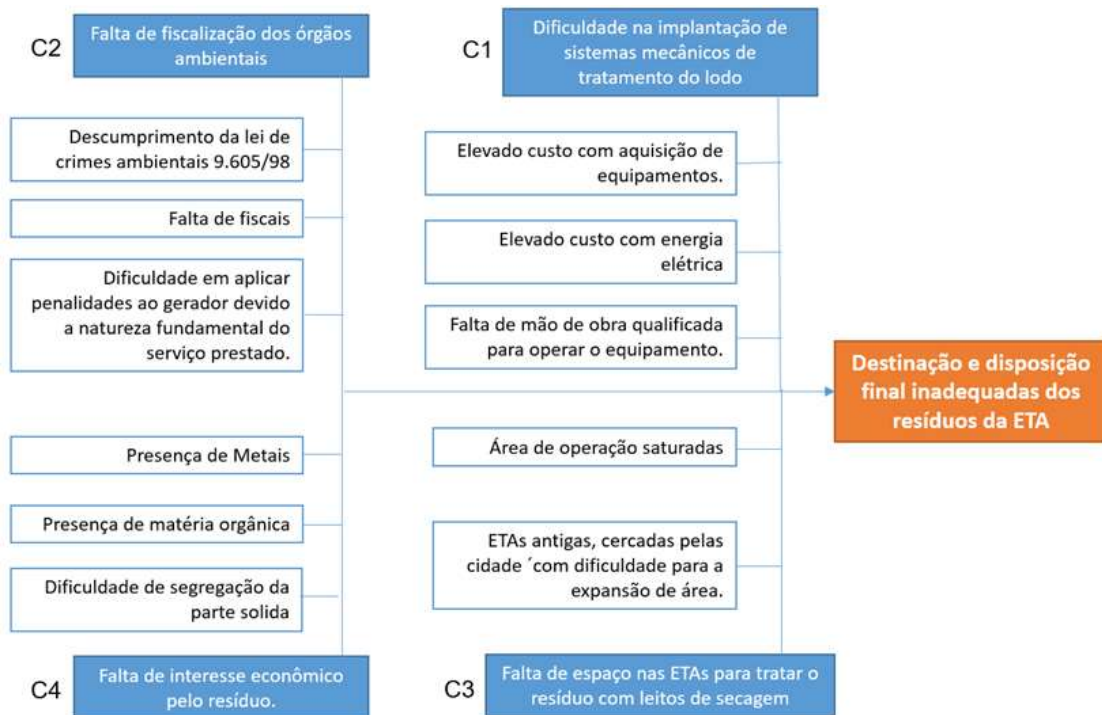
Figura 3.5 - Síntese dos impactos ambientais do lançamento in natura dos resíduos de ETA em corpos d'água



Fonte: Adaptado de Achon (2005).

A destinação inadequada dos resíduos de ETA tem causas variadas, como a falta de fiscalização dos órgãos ambientais e a dificuldade de implementar sistemas de desaguamento. Na Figura 3.5 é apresentado um diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito, com quatro causas principais (C1, C2, C3 e C4), observadas em consulta à literatura correlata, e que pode convergir para a consequente destinação e disposição inadequada destes resíduos.

Figura 3.6 - Diagrama de Ishikawa - Destinação e disposição final inadequadas dos resíduos da ETA



Legenda: C1: Causa 1; C2: Causa 2; C3: Causa 3; C4: Causa 4

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Pode-se destacar o fato de a maioria das ETAs em operação terem sido projetadas e implantadas antes da atual legislação ambiental como um dos principais fatores precursores de problemas relativos ao lodo. A falta de definição do que fazer com o lodo na ocasião da implantação das ETAs fica evidente, não apenas do ponto de vista ambiental, mas também do ponto de vista operacional, sendo essa falta de definição refletida até nos processos inadequados de limpeza dos decantadores como pode-se observar nas fotos 3.6 e 3.7.

Figura 3.7 - Funcionários utilizando mangueiras d'água a alta pressão para facilitar a remoção do lodo do fundo do decantador de uma ETA



Fonte: Achon (2008).

Figura 3.8 - Funcionários se esforçam para remover a camada espessa de lodo com o auxílio de rodos de madeira



Fonte: Achon (2008).

Além disso, a falta de fiscalização dos órgãos ambientais sobre as operações das ETAs é um fator que torna prática comum a disposição final dos resíduos em corpos d'água, uma vez que não existe responsabilização dos geradores desse resíduo. Por outro lado, o fato de as ETAs prestarem um serviço fundamental e de

natureza ininterrupta, torna difícil a aplicação de multas ou até mesmo a interrupção da produção de água para serem promovidos ajustes de conduta.

3.4.1 Reuso e reciclagem de resíduos de ETAs

Em outros países a porcentagem de lodo de ETA que é lançado nos corpos d'água é mínima, 11% nos Estados Unidos (CORNWELL *et al.*, 2000 apud URBAN *et al.*, 2018)¹ e 2% no Reino Unido (SIMPSON *et al.*, 2002). Nos EUA segundo Cornwell *et al.* (2000) predomina o uso no solo (25%), descarga no sistema público de esgoto (24%), aterro sanitário (20%), aterro exclusivo (13%) e outros (7%). No Reino Unido 52% do lodo de ETA é disposto em aterro sanitário, a descarga no sistema público de esgoto representa 29%, novos métodos 9%, aterro exclusivo 6% e lagoas 2% (SIMPSON *et al.*, 2002).

Segundo Morita (2004) o uso benéfico do lodo já é uma tendência mundial: cimenteira (EUA, Japão Alemanha e Inglaterra); revestimento cerâmico (Japão e Espanha); cerâmica vermelha (EUA, China, Espanha, Inglaterra, Índia, Portugal, Holanda, Brasil); cobertura de aterros sanitários (EUA); agricultura/controle de eutrofização (EUA, Alemanha, Espanha, Japão e Austrália); recuperação de áreas degradadas (EUA, Austrália); recuperação de coagulantes – apenas pesquisa (EUA, Polônia, Alemanha, Japão).

Achon e Cordeiro (2013) ressaltam diversas oportunidades para o lodo, tais como reduzir a geração de resíduos; tratamento/desaguamento dos resíduos gerados; uso de resíduos como matéria-prima - reuso/reciclagem após desaguamento; reuso da água; cumprimento da legislação; implantação de programas de gestão de resíduos e melhoria da imagem da empresa.

¹ CORNWELL, D. A.; MUTTER, R. N.; VANDERMEYDEN, C (2000). Commercial Application and Marketing of Water Plant Residuals. Denver: American Water Works Association, 2000.

Segundo Mattsson (2013), a visão holística do lodo necessita de boas ideias, avaliação prévia geral do sistema, alternativas que funcionem na prática, avaliação de risco baseada em conhecimento científico e comunicação (benchmarking), não esquecendo-se do sistema de tratamento que gera o lodo. Ressalta ainda que não existe uma solução geral e ideal para todos os sistemas, visto que cada qual tem suas especificidades, e as soluções requerem conhecimento especializado e avaliação do mercado.

Santos (2018) cita que a incorporação do lodo de ETA em materiais cerâmicos tem sido o alvo das maiores pesquisas envolvendo este material, devido ao lodo apresentar em sua composição argilominerais característicos da constituição das argilas, sendo que a primeira etapa no processo de reutilização do lodo é o desaguamento.

Urban *et al.* (2018) realizaram uma ampla revisão sobre o estado da arte do uso benéfico de lodo de estação de tratamento de água, e mencionam que as novas estações de tratamento devem ser projetadas priorizando a gestão e o gerenciamento de seus resíduos. Embora existam estudos indicando alternativas viáveis para o uso benéfico do lodo, a efetiva aplicação em escala real nos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento é ainda muito incipiente. Os mesmos autores indicam que a escolha da opção para a destinação dos resíduos de ETA devem refletir as características locais, havendo a necessidade de fazer um estudo de demanda do lodo, antes da definição da escolha das unidades de tratamento desse resíduo.

Na Tabela 3.2 podem ser observadas algumas opções de uso benéfico de lodo de ETA, com potencial para serem aplicadas no Brasil, e algumas de suas necessidades específicas para a utilização do lodo. É importante salientar que devido à grande variabilidade da qualidade dos lodos, estudos mais aprofundados devem ser realizados para cada caso de utilização.

Tabela 3.2 - Opções de uso benéfico do lodo de ETA

Usos	Aplicação	teor de sólidos	Necessidades específicas para o uso do lodo de ETA	Utilização
Setor ceramistas	Bloco cerâmico	acima de 20%	Composição granulométrica e porcentagem de carbono orgânico adequadas (MORITA <i>et al.</i> , 2002)	Incorporação de até 12,5% de lodo na massa de argila sem prejuízo ao material final (MORITA <i>et al.</i> , 2002)
Setor cimentício	Piso intertravado de concreto	(1) Lodo seco ao sol (ALQAM, 2011)	Lodo seco não retido na peneira n° 30 ASTM C136-06 (0,60mm) (ALQAM, 2011)	Relação lodo-cimento de 40% (ALQAM, 2011)
	Agregado miúdo em concreto para composição de calçadas	(2) 40% Costa (2011)	Não indicadas pelo autor	Até 20% do total da massa de areia (Costa 2011)
Impermeabilizante	Barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário	(3) 70% Traço argiloso 85% traço arenoso Gonçalves <i>et al.</i> , (2017)	Não indicadas pelo autor	Em mistura de 1:1 com solo argiloso e 1:0,25 para solo arenoso Gonçalves <i>et al.</i> , (2017)
Aplicação no solo	Agricultura	(1)	Lodos com elevadas concentrações de Mn podem levar a problemas de crescimento das plantas (TITSHALL e HUGHES, 2005)	Os Autores estudaram as propriedades físicas, químicas granulométricas e nutricionais do Lodo de ETA puro. (TITSHALL e HUGHES, 2005)
			Necessidade de controle de pH para evitar liberações de metais (TITSHALL e HUGHES, 2005)	
			Granulometria e mineralogia do lodo devem ser semelhantes à do solo para evitar impermeabilização Moodley (2001) apud (TITSHALL e HUGHES, 2005)	

(1) Autores não mencionaram o teor de sólidos; (2) A quantidade de água do lodo foi considerada na relação água cimento das amostras (3)O Autor considera o teor de sólidos ótimo para obter a densidade máxima da compactação da mistura

Fonte: Adaptado de Urban (2018).

Pensando na efetivo reaproveitamento do lodo em escala real, Urban *et al.* (2018) destacam que não basta verificar a viabilidade técnica e ambiental do uso pretendido, pois os problemas logísticos, a relação custo-benefício e o atendimento

aos interesses e restrições de cada ator envolvido no processo influenciam significativamente.

3.5 SISTEMAS DE DESAGUAMENTO DE LODO DE ETA

O desaguamento ou remoção de parcela de água do lodo pode ser realizado em sistemas naturais ou mecânicos e tem como objetivo a redução do volume, aumentando a concentração de sólidos do lodo, facilitando a destinação ambientalmente adequada e possibilitando o do reuso de água livre e dos sólidos resultantes.

Reis (2011) cita a importância de o sistema de desaguamento promover a rápida retirada da fração de água livre do lodo e menciona que, com a devida atenção, pode-se retornar à água drenada, dependendo da qualidade desta, ao início do processo de tratamento de água.

A definição do tipo de sistema de desaguamento a ser utilizado depende de vários fatores, podendo ser citados: intervalo e operação de remoção do lodo na estação, área necessária para implantação (disponibilidade e custo), custos de implantação (equipamentos necessários), operação do sistema, necessidade de energia elétrica e produtos químicos, condições climáticas, eficiência na redução de volume ou aumento do teor de sólidos totais do lodo desaguado, distância da estação ao destino ou disposição final, entre outros fatores.

Os sistemas de desaguamento podem ser divididos em duas categorias: sistemas naturais e sistemas mecânicos. Di Bernardo e Dantas (2005) atribuem como vantagens do desaguamento de lodo de ETA a possibilidade de diminuir custos de transporte do resíduo até o destino, e o aumento de possibilidade de emprego do resíduo como cobertura de aterros ou como matéria-prima para algumas empresas de construção. Mencionam ainda, de maneira geral, as principais vantagens e desvantagens das tecnologias de desaguamento por sistemas mecanizados e naturais, conforme Tabela 3.3:

Tabela 3.3 - Principais vantagens e desvantagens das tecnologias de desaguamento por sistemas mecanizados e naturais, de acordo com Di Bernardo e Dantas (2005)

Tipo de Sistema de Desaguamento	Vantagens	Desvantagens
Mecanizado	Sistemas independentes das características climáticas da região; requerem menores áreas de implantação	Alto custo com aquisição, operação e manutenção operação; requerem pessoal qualificado para operar; podem liberar gases tóxicos no processo que necessitam de tratamento; Custo com energia elétrica.
Natural	Baixo custo de energia elétrica na operação; sem necessidade e pessoal altamente qualificado para operação.	Necessitam de áreas relativamente grandes para implantação; O projeto requer conhecimento das condições climáticas da região; técnicas não totalmente desenvolvidas (falta de parâmetros de projeto e operação).

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

Ferreira Filho e Além Sobrinho (1998) mencionam que os equipamentos de desaguamento mecânico, para que funcionem adequadamente, geralmente necessitam de um resíduo com teor de sólidos de entrada superior a 2%. Tal observação pode ser entendida também como uma desvantagem dos sistemas mecanizados, pois para o efetivo emprego destes, e dependendo da situação da ETA, poderá haver a necessidade de implantar processos de adensamento do lodo antes do tratamento do resíduo.

Embora Queiroz (2019) cite que a maioria das tecnologias de desaguamento de resíduo de ETA emprega condicionamento químico em alguma parte do processo, com concentração 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 sem a necessidade de polímeros. Tais estudos serão apresentados na sessão sobre leitões de drenagem em escala real.

De acordo com Di Bernardo e Sabogal (2008), o teor de sólidos mínimo de 20% é a condição necessária para que os resíduos de ETA possam ser transportados até um aterro sanitário, e recomendam que independente da técnica de desaguamento adotada, esta deverá promover pelo menos esse aumento no teor de sólidos.

Além das vantagens e desvantagens apresentadas na Tabela 3.3, relacionada aos sistemas mecânicos e naturais, na Tabela 3.4 são apresentadas algumas vantagens e desvantagens específicas de das principais técnicas de desaguamento, bem como os teores de sólidos atingidos no lodo após desaguamento, relatados pela literatura.

Tabela 3.4 - Vantagens e desvantagens específicas de algumas técnicas de desaguamento

Técnica de desaguamento	Teor de sólidos no lodo desaguado	Vantagens	Desvantagens
Centrifuga	16 - 28 Reali (1999); 16-18% para lodos se sulfato Richter (2001)	Adequada para locais com limitação de espaço Richter (2001).	Consumo de energia e produtos químicos Barroso (2007).
		Aceleram o processo de sedimentação em operação contínua. Operação é simples, limpa e relativamente econômica (Fontana 2004).	Tambor está sujeito à abrasão Richter (2001). Relatos de dificuldade operacional (Barroso 2007).
Filtro prensa de esteiras	20-25 Cornwell (1987); 15-20% para lodos se sulfato Richter (2001)	Operação contínua (Fontana 2004).	Necessita de unidades para pré- espessamento do lodo Fontana (2004).
Filtro prensa de placas	40 - 50% Richter (2001)	Obtenção de resíduos com maior concentração de sólidos.	Operação em batelada, elevado custo operacional. Richter (2001).
Lagoas de Lodo	7- 15 Cornwell (1987)	Alternativa de baixo custo de implementação e operacional em locais com clima favorável.	Impermeabilização do fundo da lagoa (Barroso 2007).
			Necessita de clima favorável
			Área de ocupação de 2 a 3 vezes maior em relação aos leitos de secagem (Fontana 2004).
Leitos de secagem	20 - 25 Cornwell (1987)	O tempo de drenagem nos leitos é o principal fator na remoção da água livre o que facilita as etapas posteriores (Fontana 2004).	Climas úmidos dificultam a evaporação Barroso (2007).
			São dimensionados para um período de armazenamento de 3 a 4 meses, o que limita o número de aplicações por ano. Richter (2001).
Sistemas fechados de geotêxtil (Tubo Geotêxtil)	20-30 % (GUIMARÃES et al 2014)	O fator clima é pouco relevante em sua adoção.	Necessidade de grandes períodos de consolidação (Reis 2011).

		Possibilidade de recargas sucessivas até a saturação do sistema. Vertematti (2015).	<p>Necessidade de aplicação de polímeros (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011 apud Silveira 2011).</p> <p>Pouco suscetível a evaporação em condições climáticas favoráveis.</p> <p>Necessidade de pré-adensamento para lodos com baixo teor de sólidos (Ferreira e Vianna 2013).</p> <p>Necessidade de troca do tubo de geotêxtil ao consolidar-se o lodo.</p> <p>Controle da pressão interna para evitar risco de acidentes (Queiroz 2019 apud (Liao e Bhatia, 2006).</p>
Bags Verticais abertos	35 % (Pessoa 2007)	<p>Recomendado para espaços reduzidos por apresentar maior dimensão vertical (Pessoa 2007).</p> <p>Possibilidade de reuso do BAG (Pessoa 2007).</p>	Necessidade de implementação de estruturas de suporte sustentação dos BAGs.
Leito de drenagem	22 - 69 % (Fontana 2004)	<p>redução de tempo de drenagem com ganho de qualidade, quando comparado com o leito de secagem (CORDEIRO 2000).</p> <p>Possibilidade de uso sucessivo do geotêxtil sem prejuízo ao sistema Cordeiro et al (2014).</p>	Ocorrência de precipitação durante a secagem pode diminuir o teor de sólidos (Fontana 2004).

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

É importante destacar que os teores de sólidos mencionados na Tabela 3.4 podem não refletir a realidade encontrada na prática das ETAs, visto que fatores como as características dos lodos brutos, escala da técnica empregada, condições climáticas e operacionais podem influenciar significativamente na eficiência do desaguamento. De forma geral, no meio técnico brasileiro, estimam-se teores de sólidos dos resíduos tratados em sistemas fechados como centrifugas ou Bags/SCR situados entre 17 e 22%, e acima de 20% para sistemas naturais abertos, podendo atingir valores entre 40 e 60% na fase de secagem.

3.6 LEITO DE DRENAGEM (LD): ASPECTOS GERAIS

O sistema natural denominado Leito de Drenagem (LD) foi proposto por Cordeiro (2001), que estudou a possibilidade de modificação da estrutura dos leitos de secagem tradicionais, verificando que a colocação de manta de geotêxtil sobre a camada filtrante do leito possibilitava a remoção mais efetiva da água livre dos lodos de ETAs. Os resultados obtidos evidenciaram que a areia (usada no leito de secagem tradicional) e a espessura da camada filtrante não eram decisivas na remoção de água livre (CORDEIRO, 2001).

Nesse sentido, Achon e Cordeiro (2003 e 2004) desenvolveram pesquisas com uso de Leitões de Drenagem (LD) para verificar a readaptação de lagoas de lodo que apresentavam inúmeros problemas para o desaguamento de lodo de ETA. Os resultados obtidos demonstraram a diminuição do tempo de remoção da água livre em relação às lagoas de lodo e obtenção de drenado de boa qualidade, passível de reutilização ou recuperação. Assim, os leitões de drenagem evidenciaram-se como um sistema natural de desaguamento de lodo superior aos leitões de secagem tradicionais e lagoas de lodo.

Outras pesquisas com resultados promissores foram desenvolvidas por Fontana (2004), Borba (2005), Barroso (2007), Achon *et al.* (2008), Reis (2011) e Cordeiro *et al.* (2014), para desaguamento de lodo de ETA em LD. Segundo Achon *et al.* (2008), as características do Leito de Drenagem, desenvolvido por Cordeiro (2001), atenua a colmatação e facilita sobremaneira a drenagem, ao contrário do que se observam em outros sistemas naturais de redução de volume de lodo de ETA, como os leitões de secagem tradicionais e as lagoas de lodo.

Porém, a grande maioria das pesquisas realizada com LD usa o mesmo tipo de manta geotêxtil não tecida de densidade 600g/cm², segundo recomendações de Cordeiro (2001), cujas características encontram-se na Tabela 3.4 (CORDEIRO *et al.*, 2014).

Tabela 3.5 - Características da manta geotêxtil utilizada nos ensaios de desaguamento de lodo em Leito de Drenagem (LD)

Características	Unidades	600g/m ²
Espessura	mm	4,5
Porosidade	%	>90
Permeabilidade normal	cm/s	3 x 10 ⁻¹
Abertura	um	60

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

O uso de manta geotêxtil com densidade superficial de 600 g.m⁻² deve-se ao fato da eficiência de desaguamento combinado à necessidade de lavagem das mantas após a remoção do lodo desaguado (CORDEIRO, 2001). Porém, foi verificado que não há necessidade de limpeza ou lavagem das mantas após o uso (Cordeiro *et al.*, 2014), o que pode aumentar a resistência e durabilidade destas, permitindo a reutilização e descargas sucessivas sem necessidade de limpeza apenas a remoção do lodo desaguado.

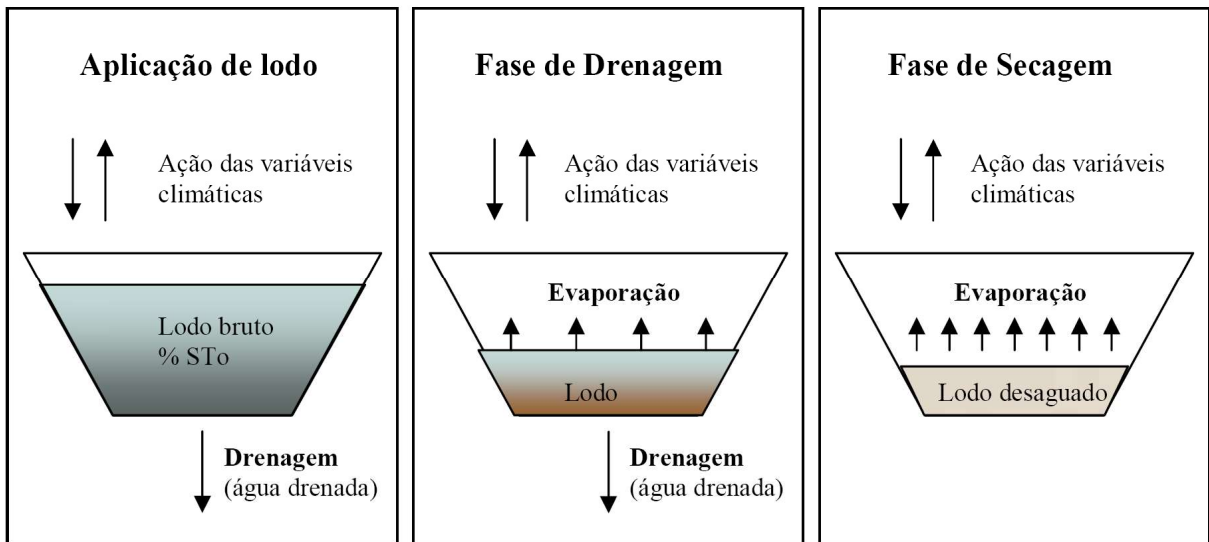
Barroso (2007), após a realização de ensaios de desaguamento de lodo de ETA em Leitões de Drenagem em escala de bancada, conclui que ocorrem duas fases distintas no desaguamento, a saber:

a) Fase de drenagem – Ocorrência de efetiva drenagem de água livre através da ação filtrante da manta de geotêxtil e concomitante secagem por evaporação, mas com reduzida influência das variáveis climáticas.

b) Fase de secagem – Ausência de drenagem de água livre, a não ser quando há ocorrência de precipitação (chuva), com secagem predominantemente por evaporação por ação e influência das variáveis climáticas.

Na figura 3.8, pode-se observar as fases do desaguamento de lodo de ETA confirmadas por Barroso (2007).

Figura 3.9 - Fases do desaguamento de lodo de ETA em Leito de Drenagem, segundo Barroso (2007)



Fonte: Adaptado de Barroso (2007).

Silveira *et al.* (2015) avaliaram o LD em escala de bancada e concluíram que o desaguamento de lodo de decantadores de ETA por leito de drenagem com mantas 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. Kuroda *et al.* (2014) realizaram ensaios em escala piloto, resultando na extinção da lâmina líquida em 1 dia e após 7 dias, apresentou 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 em apenas dois teores de sólidos totais 1,5% e 1,6% e uma Taxa de aplicação de sólidos (TAS) de 7,5Kg/m², para a mesma manta com gramatura ou massa por unidade de área de 600g/m², a mesma especificada por Cordeiro (2001) e utilizada por Barroso (2007) e Achon *et al.* (2008).

Para sistematizar os resultados em relação à qualidade de água drenada, Silveira (2012) estabeleceu duas condições de enquadramento (I e II) e uma condição de reaproveitamento (III):

- Condição I: drenados com valores de turbidez inferiores a 40 uT considerando a possibilidade de enquadramento da água drenada em

corpos de água doce Classe I, segundo estabelecido pela Resolução 357/05 do Conama;

- Condição II: drenados com valores de turbidez inferiores a 100 uT considerando a possibilidade de enquadramento da água drenada em corpos de água doce Classe II, segundo estabelecido pela Resolução 357/05 do Conama, classificação da maioria dos corpos hídricos receptores da região;
- Condição III: drenados com valores de turbidez inferiores a 10 uT considerando a possibilidade de reaproveitamento da água drenada no sistema de produção de água da própria ETA.

Silveira (2012) conclui que apesar da turbidez ser um parâmetro indireto e inespecífico, seu uso como parâmetro de controle de eficiência se mostrou adequado, visto que em seus experimentos, as amostras que atenderam às condições de enquadramento I e II em relação a este parâmetro de controle, apresentaram de maneira geral, qualidade compatível às condições de enquadramento consideradas.

Santos *et al.* (2014) realizaram ensaios em escala laboratorial de LD usando lodo de ETA com um único valor de 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 leito de 150 mm de diâmetro 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. No entanto, é importante o desenvolvimento de mais estudos sobre o tema.

Silveira (2012) recomenda 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. Segundo Fontana (2004) e Reali (1999), a concentração de sólidos pode variar 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%.

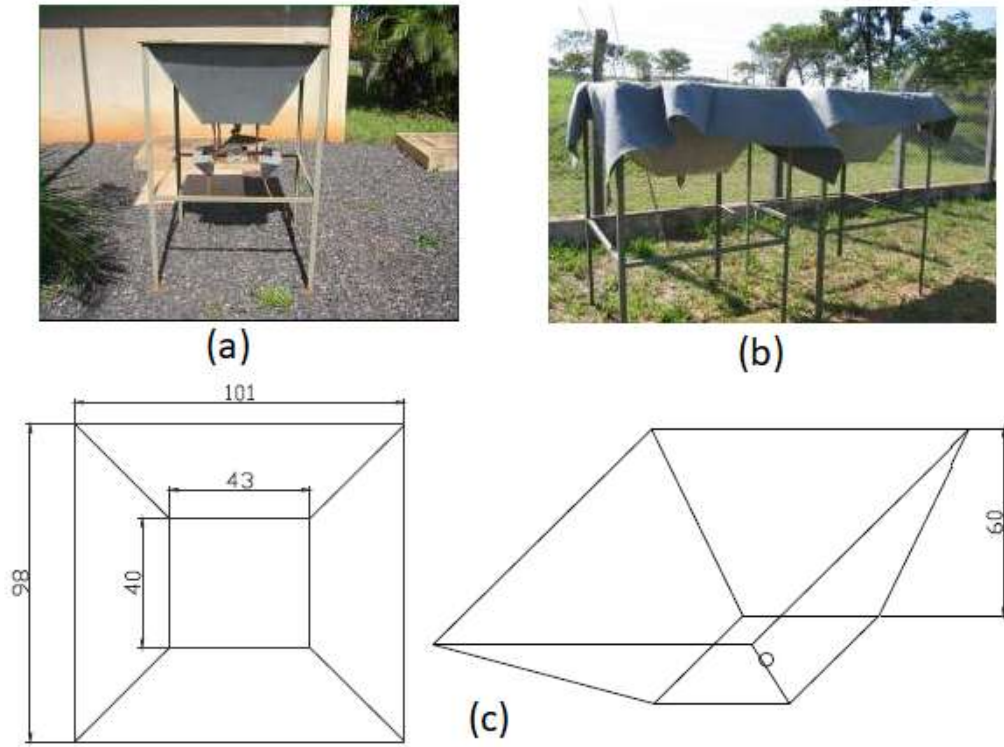
Segundo Santos *et al.* (2014), apesar dos diversos trabalhos já realizados sobre o tema, os conhecimentos ainda são insuficientes para caracterizar perfeitamente a tecnologia do LD, destacando a importância do desenvolvimento de mais estudos, visto que o lodo, tanto de ETA quanto de ETE, é produzido em milhares de toneladas diárias e deve ser corretamente disposto na natureza.

3.6.1 Leito de Drenagem: pesquisas em escala laboratorial e piloto

Segundo Fontana (2004), Achon, Barroso e Cordeiro (2008), no projeto e implantação de Leitos de Drenagem para desaguamento de lodo devem ser considerados variáveis como: espaço territorial, disponibilidade financeira, clima e outras variáveis dependentes das características e exigências do lodo e do sistema de LD. Estas variáveis (fatores) devem ser avaliadas em **escala laboratorial** antes da implantação, possibilitando a otimização e definição de parâmetros de projeto de forma mais confiável, eficiente e efetiva.

Barroso (2007) utilizou três tipos de leitos de drenagem em seus experimentos: 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. Em todos os seus experimentos, o autor utilizou o geotêxtil não tecido com gramatura ou massa por unidade de área de 600g/m². Na realização de ensaios preliminares para verificar a necessidade e influência de condicionamento do lodo antes da drenagem, os resultados dos ensaios não evidenciaram grande influência do condicionamento químico nas características e desempenho no desaguamento por leito de drenagem. Nas figuras 3.9 e 3.10 pode-se observar os leitos utilizados por Barroso (2007) em sua pesquisa.

Figura 3.10 - (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 utiliza dos por Barroso (2007)



Fonte: Barroso (2007).

Figura 3.11 - (a) Vista do Leito de Drenagem II utilizado por Barroso (2007). (b) protótipos cilindros do Leito de Drenagem III Utilizados por Barroso (2007)



Fonte: Barroso (2007).

Na Tabela 3.6 pode-se observar os resultados dos desaguamentos realizados por Barroso (2007) em ensaios, utilizando o Leito de Drenagem I e II, conforme ilustrado na Figura 3.9 e 3.10, com lodos provenientes de ETA que utiliza sulfato de alumínio como coagulante.

Tabela 3.6 - 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	2,6	I	8,9	1° dia	30,4	7
3a	7,6	II	9,7	3° dia	88,9	7
3b	0,76	I	12,6	3° dia	98,1	6
5a	2,7	II	18	(3)	50,3	7
5b	4,2	II	14,5	(3)	42,3	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: Adaptado de Barroso (2007).

Conforme apresentado na Tabela 3.6, não se pode estabelecer uma relação entre o teor de sólidos inicial e o teor de sólidos após o fim da drenagem de água livre, uma vez que o próprio autor não faz menção a essa aleatoriedade nem infere sobre as possíveis causas. Considerando a fase de secagem, Barroso (2007) indica que ocorreu uma diminuição brusca do valor de isolamento a partir do quarto dia para os ensaios 1, 5a e 5b, e conclui que tal parâmetro é decisivo para a velocidade da drenagem. Também cita que a precipitação, como fator isolado, não se mostrou determinante na velocidade de secagem, fato que é corroborado ao observar-se os valores %ST final para os ensaios 5a e 5b.

Reis (2011) construiu “mini leitões” de drenagem e realizou ensaios escala laboratorial reduzida para testar alguns tipos de geotêxteis (não tecidos de gramatura de 150, 200, 300 e 400g.m⁻² e Tecido com gramatura de 600g/m²), a fim de identificar o geotêxtil com melhor performance em termos de 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 por Barroso (2007). Nos ensaios preliminares realizados por Reis (2011) o “minileito” (Figura 3.11) foi carregado com 250ml de lodo bruto, e após os tempos de 1,0 e 1,5 minutos, com a identificação da diminuição do fluxo a ponto de gotejamento, realizou-se a medição do volume e turbidez do lodo drenado. O autor não menciona o teor de sólidos do lodo inicialmente aplicado e indica superioridade do geotêxtil tecido de gramatura de 600g.m⁻² em relação aos demais, porém as conclusões se basearam mais na análise qualitativa do líquido drenado em termos de turbidez.

Figura 3.12 - (a) “Minileito” de drenagem utilizado por Reis (2011)). (b) despejo no “minileito” de drenagem utilizado por Reis (2011)



(a)



(b)

Fonte: Reis (2011).

Nos ensaios posteriores, usando um protótipo de Leito de Drenagem similar ao apresentado na Figura 3.10, Reis (2011) realizou seis ensaios variando a concentração de sólidos inicial do lodo, com volume de lodo inicial aplicado de 220 litros e aproximadamente 50cm, e indicou que o tempo médio de remoção de água presente no lodo através da drenagem foi de aproximadamente quatro dias. Já o tempo médio de duração de cada ensaio, incluindo a fase de drenagem e secagem foi de sete dias. Na Tabela 3.7 pode-se observar a evolução no teor de sólidos nos seis ensaios realizados por Reis (2011), onde o autor verificou a influência de cobertura plástica nos leitos em sua fase de secagem.

Tabela 3.7 - Evolução do teor de sólidos nos ensaios realizados por Reis (2011)

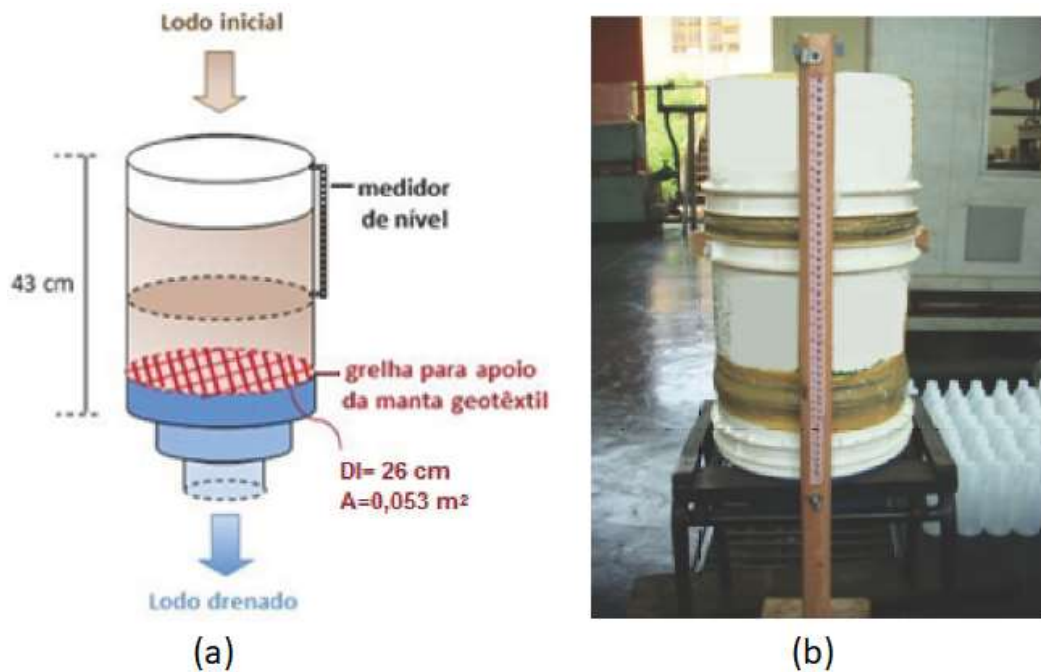
	DIA(S) APÓS DESPEJO DE LODO NO LEITO (% de Sólidos Totais)											
	Bruto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
E-01 Coberto	0,42	9,46	12,24	15,01	19,09	55,50	75,03	88,77	-	-	-	-
E-01 S/ Cobertura	0,42	7,38	8,95	12,27	15,18	26,21	31,34	56,59	-	-	-	-
E-02 Coberto	0,20	8,18	14,64	20,69	37,44	63,87	89,89	-	-	-	-	-
E-02 S/ Cobertura	0,20	7,14	12,76	17,93	24,12	43,79	69,18	-	-	-	-	-
E-03 Coberto	1,41	6,89	9,58	11,91	15,61	18,44	27,82	46,71	85,24	93,29	-	-
E-03 S/ Cobertura	1,41	5,67	8,19	9,72	13,08	16,43	21,00	38,76	79,47	88,58	-	-
E-04 Coberto	1,20	7,98	9,47	12,32	23,12	37,69	56,45	83,02	-	-	-	-
E-04 S/ Cobertura	1,20	4,84	7,33	10,52	21,42	32,04	54,13	75,46	-	-	-	-
E-05 Coberto	0,18	14,69	32,28	79,80	89,49	-	-	-	-	-	-	-
E-05 S/ Cobertura	0,18	7,81	10,71	20,17	79,47	-	-	-	-	-	-	-
E-06 Coberto	2,22	5,50	10,37	11,66	13,61	13,73	14,08	14,80	16,37	16,91	17,29	48,32
E-06 S/ Cobertura	2,22	3,34	6,04	6,27	8,71	7,03	8,25	9,07	8,37	10,08	11,94	14,75

Fonte: Reis (2011).

Na Tabela 3.7 pode-se verificar que os maiores teores de sólidos iniciais do lodo bruto apresentam maiores tempos de secagem. Com menores teores de sólidos no intervalo observado, o autor recomenda que sejam estudos específicos variando a altura da massa sólida despejada no leito de drenagem, para que se possa concluir a respeito de qual seria a altura limite de acordo com o percentual de Sólidos Totais presentes no lodo bruto.

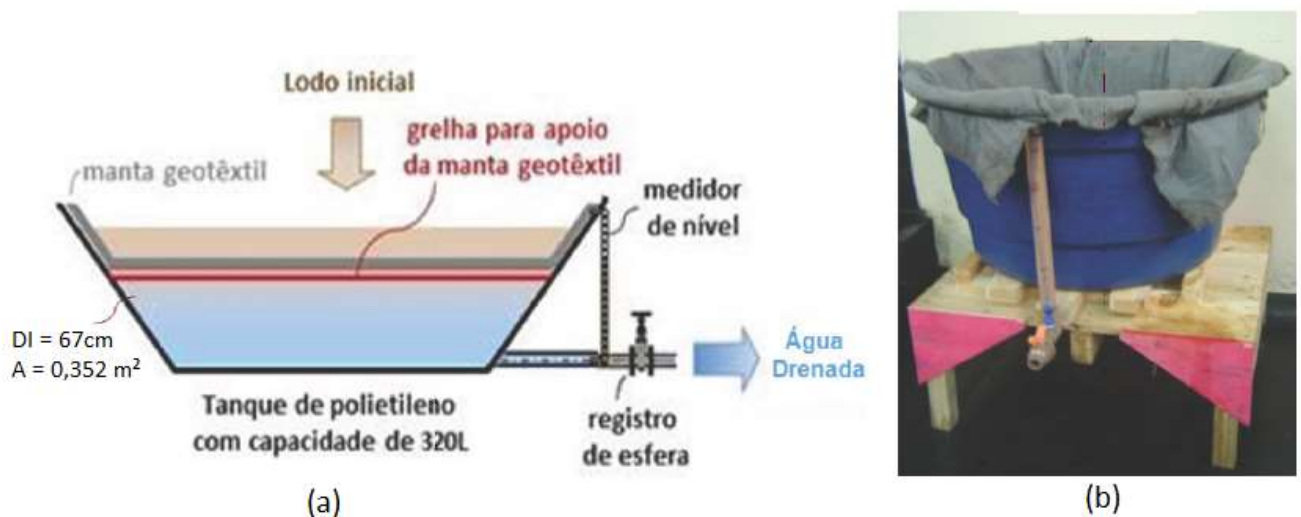
Silveira (2012) realizou ensaios de drenagem em escala de bancada e piloto nos quais verificou porcentagem de água drenada com qualidade compatível com corpos de água doce estabelecidos pela Resolução Conama 357/05. Além disso, avaliou parâmetros quantitativos como vazão do drenado e volume drenado acumulado. Para os ensaios de escala de bancada foi utilizado recipiente plástico cilíndrico com diâmetro de 0,26m e altura útil de 0,43m, com capacidade total de 30L. Os ensaios em escala piloto foram realizados com LD composto por um tanque de polietileno com capacidade de 320 L, provido de uma grelha plástica para suporte da manta e tubulação de saída inferior para coleta do drenado.

Figura 3.13 - (a) esquema do Leito de drenagem em escala reduzida utilizado por Silveira (2012) (2012). (b) Foto do Leito de drenagem utilizado por Silveira (2012)



Fonte: Silveira (2012)

Figura 3.14 - (a) Esquema do Leito de drenagem em escala Piloto utilizado por SILVEIRA, C. (2012). (b) Foto do Leito de drenagem em escala piloto utilizado por SILVEIRA, C. (2012)



Fonte: Silveira (2012).

Silveira (2012) verificou tempos de drenagem distintos entre os ensaios realizados no leito de escala de bancada e o leito piloto para o mesmo lodo, com a

mesma taxa de aplicação de sólidos, porém com Teor de Sólidos totais inicial distintos. Para os dois experimentos, também verificou-se maior qualidade da água drenada no experimento de escala de bancada. O que, segundo a autora, evidencia que a escala adotada influencia nos resultados da drenagem. Na Tabela 3.8 pode ser observado um resumo dos resultados obtidos por Silveira (2012) em seus quatro ensaios de desaguamento de lodo por LD.

Tabela 3.8 - Resultados dos ensaios de desaguamento por LD realizados por Silveira (2012)

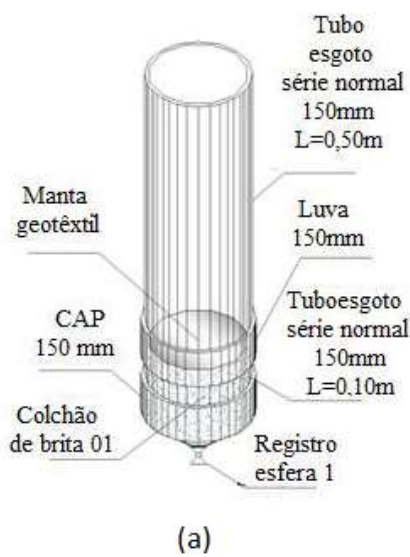
Escala Coagulant e ETA	Escala bancada		Escala piloto	
	FeCL3	(PAC)	FeCL3	(PAC)
%ST inicial	1,5	1,6	0,91	1,27
TAS (kg.m- 2)	7,5	7,5	7,5	6,5
volume que atendeu a condição I (%)	78	91	66	84
volume que atendeu a condição II (%)	80	91	69	89
volume que atendeu a condição III (%)	76	89	62	71
Tempo de extinção da lâmina liquida (h)	41	43	27	30
%ST do fim da drenagem	15,7	13,9	12,9	11,2
%ST após secagem	75,4	82,5	16,6	30,2
Tempo de secagem (dias)	13	13	7	7

Fonte: Adaptado de Silveira (2012).

Santos (2012) avaliou o desempenho de três geotêxteis em leitos de drenagem em escala de bancada, conforme Figura 3.14, quanto aos parâmetros de vazão drenada, volume drenado de água livre e qualidade da água drenada, como cor e turbidez ao longo do tempo de drenagem. Para tanto, foram realizados três ensaios

em cada geotêxtil, com TAS de $1,75 \text{ kg.m}^{-2}$, $3,5 \text{ kg.m}^{-2}$ e $7,0 \text{ kg.m}^{-2}$, um resumo dos resultados observados por Santos (2012) pode ser observado na Tabela 3.9.

Figura 3.15 - (a) Esquema do Leito de drenagem utilizado por SANTOS, (2012). (b) Foto do Leito de drenagem utilizado por SANTOS (2012).



Fonte: Santos (2012).

Tabela 3.9 - Resumo dos resultados observados por Santos (2012)

Ensaio	Ensaio I			Ensaio II			Ensaio III		
	RT-21	RT-26	RT-31	RT-21	RT-26	RT-31	RT-21	RT-26	RT-31
TAS (kg.m^{-2})	1,75	1,75	1,75	3,5	3,5	3,5	7	7	7
Tempo de drenagem (h)	2	2	2	7	7	7	48	48	48
%ST inicial	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
*%ST do fim da drenagem	9	8	9	10	9	10	9	10	10

*%ST após secagem	90	90	90	20	17	20	31	36	31
dias de secagem	7	7	7	7	7	7	7	7	7

*Valores obtidos através de leitura de gráficos

Fonte: Adaptado de Santos (2012).

Santos (2012) atribui às variáveis climáticas as diferenças nos teores de sólidos finais entre os três ensaios, e em suas conclusões indica que o tempo de drenagem é proporcional à taxa de aplicação de sólidos do lodo inicial, indicando que a TAS de 3,5kg.m⁻² seria a mais apropriada para as condições da pesquisa realizada, considerando também os menores espaços territoriais para a implantação do sistema de LD. Considerando a fase de secagem, os resultados demonstram que foram atingidos valores de ST% maiores aos 7 dias para menores TAS, justificado pela transferência de calor. No que se refere à fase de drenagem, a autora menciona que os primeiros 15 minutos do desaguamento fornecem drenados com valores elevados de Turbidez. Pode-se notar também, na Tabela 3.8, que os ensaios realizados usaram lodo com o mesmo teor de sólidos iniciais, de 1,7%, e variando a TAS, demonstraram que o tempo de drenagem pode variar significativamente, de 2 a 48 horas, até atingir um valor de aproximadamente 9% de ST no lodo desaguado. Pode-se concluir com os resultados desta pesquisa, que o tempo de drenagem é diretamente proporcional à TAS, ou seja, quanto maior a TAS, maior o tempo de drenagem para um mesmo valor de ST inicial do lodo. Porém, a pesquisa só investigou um valor de ST inicial do lodo bruto de 1,7%.

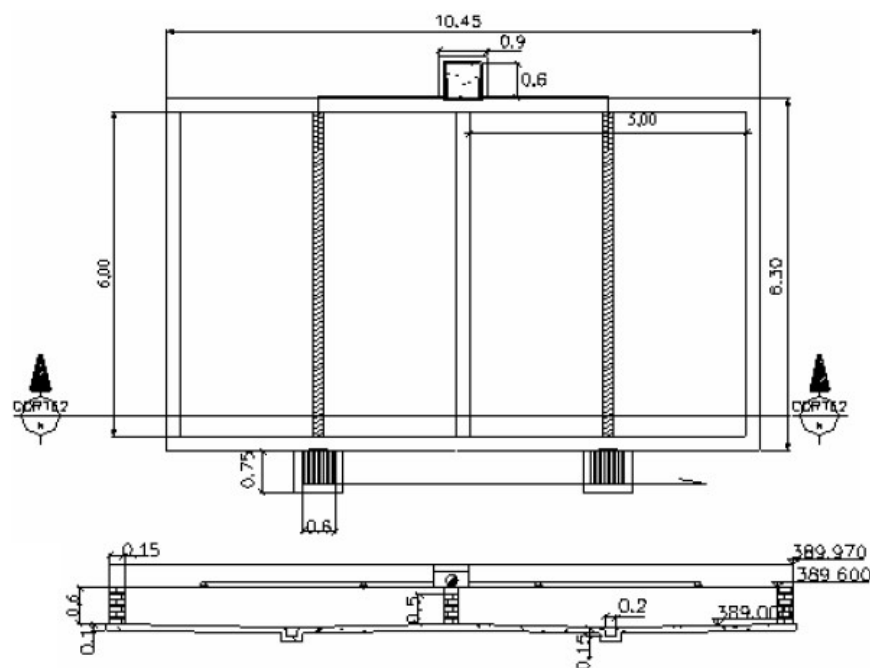
3.6.2 Leito de Drenagem: pesquisas em escala real

Foram encontradas na literatura poucas pesquisas realizadas em escala real, porém vale destacar algumas com resultados relevantes, que podem contribuir com os estudos e análise do sistema de LD para desaguamento de lodo de ETA.

Fontana (2004) implantou um sistema de leito de drenagem em escala real na ETA do município de Cardoso – SP durante sua pesquisa de mestrado, visando promover o desaguamento dos lodos provenientes dos decantadores e água de lavagem dos filtros. Na ocasião da pesquisa, a ETA atendia a uma população de 4920 habitantes, com uma capacidade nominal de tratamento de 25L/s. O LD foi construído, conforme Figura 3.15, sendo composto por dois módulos, cada um com área de 30 m² e altura de 0,50 m, utilizando o geotêxtil não tecido de gramatura ou massa por unidade de área de 600g/m².

Os resultados demonstraram elevado desempenho no desaguamento, com boa qualidade dos drenados e redução de 84,52% de volume do lodo aplicado, para uma concentração de sólidos totais inicial do lodo bruto de 2,51% após 30 dias. A pesquisa não apresenta ou distingue o tempo quando cessa o fluxo durante a fase de drenagem e a redução incremental de volume do lodo, que ocorre durante a fase de secagem, através da evaporação.

Figura 3.16 - Planta e corte dos módulos do Leito de Drenagem implantados por Fontana (2004)



Fonte: Fontana (2004).

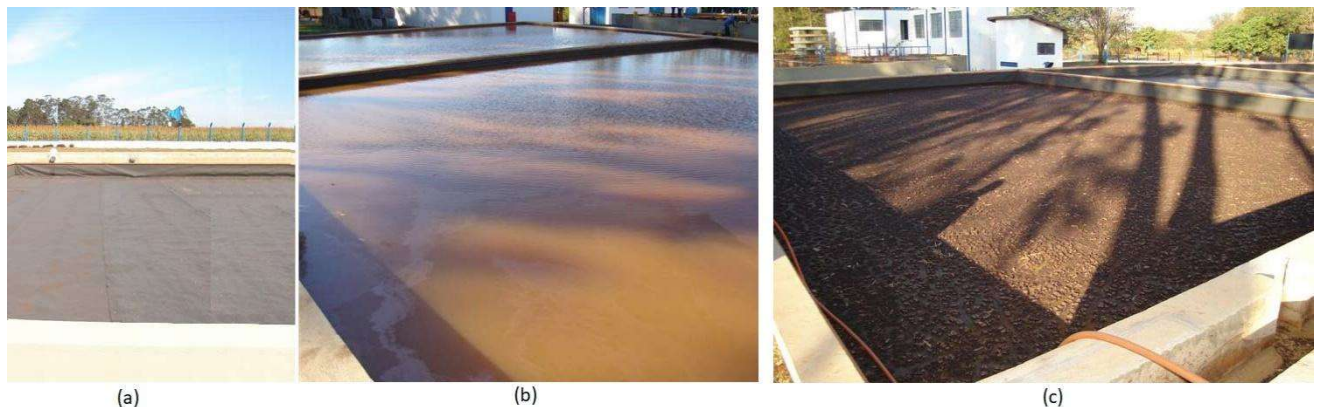
Durante a pesquisa em escala real com o LD, Fontana (2004) observou que a ocorrência de precipitações sob o leito só interfere na eficiência de desaguamento, em termos de teor de sólidos do lodo desaguado, se estas ocorrerem nos primeiros dias após o lançamento do lodo, antes da exposição do geotêxtil devido à retração dos sólidos (lodo desaguado), que foi observada após no início da fase de secagem (após a fase de drenagem). Foi observada a variação do teor de sólidos ao longo do tempo para dois lançamentos sucessivos. Para o primeiro lançamento, embora tenha se observado precipitações 21 dias após o lançamento, elas ocorreram posteriormente ao aparecimento das rachaduras na torta de lodo provenientes da retenção dos sólidos, já na fase de secagem. Neste primeiro ensaio ou lançamento de lodo em escala real, o lodo aplicado possuía teor de sólidos médio inicial de 2,51% e observou-se o teor de sólidos final de 68,90% após 21 dias. Para o segundo ensaio ou lançamento, com teor de sólidos médio inicial de 2,84%, observou-se o teor e sólidos final de 24,8% após 32 dias. De acordo com Fontana (2004), os resultados indicam que nos primeiros 6 dias do segundo lançamento, ainda não havia se observado rachaduras na massa de sólidos, que é esperada no início da fase de secagem, e atribui a diferença de teor de sólidos finais à frequência de chuvas no período inicial do lançamento no ensaio 2.

Cordeiro *et al.* (2014) realizaram visitas técnicas à ETA de Cardoso-SP para avaliar as condições do LD após 10 anos de sua implantação, resultado da pesquisa realizada por Fontana (2004), e indicaram que uma das grandes contribuições do estudo de caso foi avaliar a vida útil do geotêxtil utilizado, que só foi trocado após uma década de uso.

Reis (2011) descreveu o funcionamento do Leito de Drenagem implantado na ETA de Guaíra-SP, que na ocasião tratava uma vazão de 130 L/s, assim como em Cardoso-SP. Segundo o autor, a água drenada apresenta qualidade adequada para ser reciclada e retornar para o início do tratamento, logo após a mistura rápida. O LD de Guaíra possui dimensões de 20m x 13m x 0,5m de altura e a altura máxima do resíduo dentro dos leitos é de 0,40m, que ao serem desaguados, resultam em alturas de aproximadamente 2,0 a 3,0 cm. De acordo com Reis (2011), o lodo bruto lançado

nos leitos geralmente apresentava teor de sólidos totais de 1 a 2% e o tempo médio de exposição do lodo no LD para remoção de água variava entre 40 e 45 dias.

Figura 3.17 - Leito de drenagem ETA Guaíra - (a) Disposição do Geotêxtil. (b) Leito de drenagem Cheio de resíduo. (c) Lodo Seco



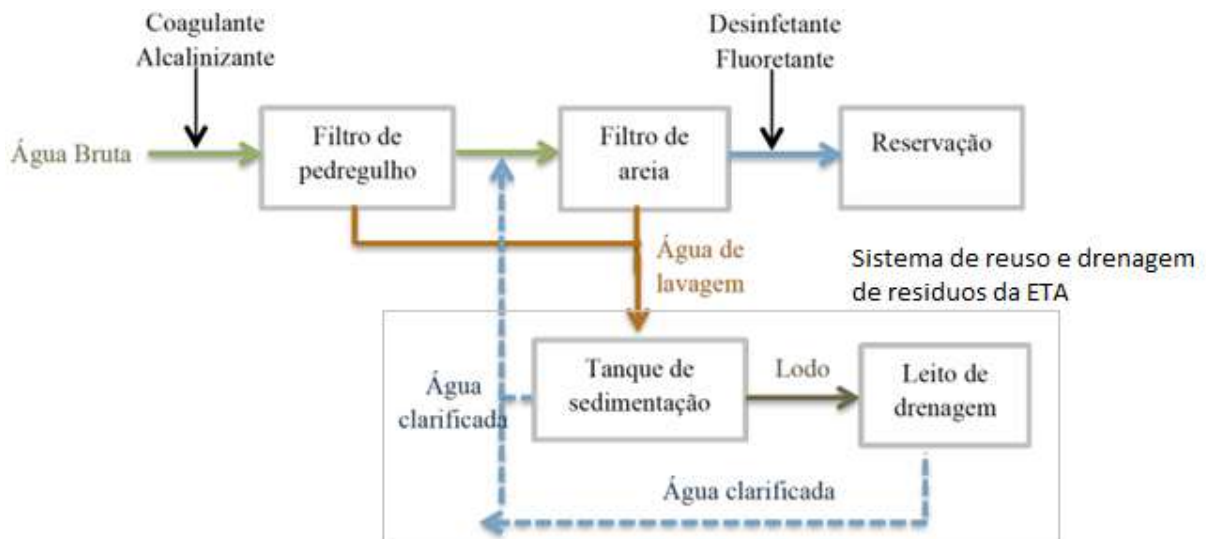
Fonte: Reis (2011).

Além do funcionamento do leito em Guaíra, Reis (2011) apresentou o funcionamento do leito implantado na ETA de Guanhães-MG com capacidade média de tratamento de água de 60 L/s. Na ocasião, a ETA possuía quatro unidades de leito de drenagem instaladas e em funcionamento, cujas dimensões são 7,5 m de largura, 16,0 m de comprimento e aproximadamente 1,0 m de profundidade, resultando numa capacidade volumétrica total de 120 m³ cada. Os leitos de drenagem recebiam lodo apenas dos decantadores e a água drenada em sua operação não era reciclada para o início do tratamento. Em épocas secas, o tempo de exposição do lodo nos leitos de drenagem era de aproximadamente 30 a 45 dias para que este pudesse ser removido e ser iniciada nova operação. O autor não indica a altura de camada de lodo nem a concentração de sólidos iniciais do lodo aplicado.

Lustosa (2017) desenvolveu e implementou sistema para promover a reutilização da ALAF em uma estação de tratamento por filtração direta na cidade de Colmeia – TO com 6500 habitantes, que operava na ocasião com uma vazão de 17 L/s em 21 horas por dia. Este sistema consistiu na implantação de tanque de sedimentação da ALAF e a implementação de leito de drenagem com a utilização de

geocomposto para a segregação da parte sólida do resíduo, o que possibilitou a reinserção da parte líquida na cadeia de produção. O autor não menciona a concentração de sólidos do resíduo aplicado sob o leito, mas indica uma camada inicial com altura de 25 cm. O fluxograma do sistema de reaproveitamento e drenagem dos resíduos pode ser observado na Figura 3.17. A implantação promoveu o reuso dos drenados o que acarretou a diminuição da água bruta recalçada, reduzindo custos com eletricidade e produtos químicos do tratamento. Conforme Lustosa (2017), o tempo médio de drenagem foi de 2 horas e após 2 dias o lodo alcançava teores de sólidos de 15%, bem como o tempo médio de secagem, quando o lodo atingiu um teor de sólidos de 30%, foi de 5 dias. O custo total da implementação do sistema foi de R\$18,30 por habitante atendido pela ETA (ano base 2014) e, segundo o autor, a redução de gastos com eletricidade pagaria a implementação do sistema em 20 anos.

Figura 3.18 - Fluxograma de implantação de sistema de reuso e drenagem de resíduos de ETA com filtração direta



Fonte: Lustosa (2017).

3.7 GEOTÊXTEIS USANDO EM SISTEMAS DE DESAGUAMENTO E LD

De acordo com a NBR 12.553 (2003), geotêxtil é um 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 desempenhe várias funções em uma obra geotécnica.

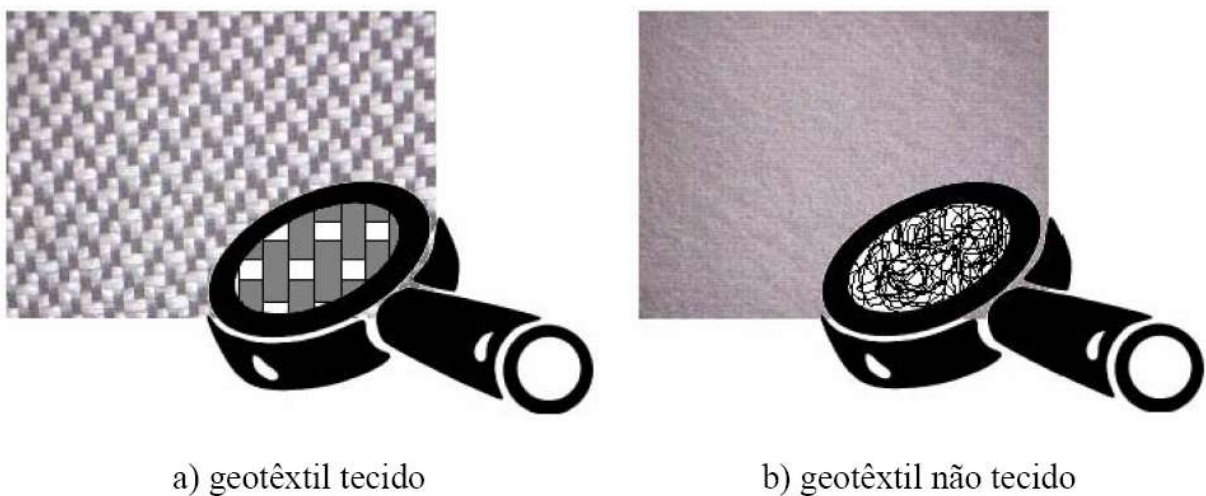
A estrutura do geotêxtil pode ser de três tipos: tecido, não tecido ou tricotado. O que diferencia estas estruturas é sua técnica de fabricação que, por sua vez, influencia na disposição dos fios.

Segundo Freitas (2003), os geotêxteis tecidos são aqueles fabricados por processos de tecelagem em que há entrelaçamento ordenado das fibras em duas direções, em geral, num ângulo de 90°. Os tricotados são obtidos através do entrelaçamento dos fios por tricotamento.

Os geotêxteis não-tecidos, de acordo com Vertematti (2015), são aqueles fabricados através da interligação por processos mecânicos, térmicos ou químicos dos filamentos ou fibras com disposição aleatória.

A Figura 3.18 apresenta uma imagem dos geotêxteis tecidos e não tecidos, detalhando seus arranjos estruturais, que são os dois principais tipos usados em pesquisas de desaguamento de lodo.

Figura 3.19 - Arranjo estrutural dos geotêxteis tecido e não tecido



Fonte: Benjamim (2006).

Geralmente, os ensaios utilizados para caracterizar os geotêxteis podem ser divididos em quatro grupos: físicos, mecânicos, hidráulicos e de desempenho. Os ensaios físicos são necessários para a identificação do produto (gramatura e espessura). Os mecânicos são para obter parâmetros do comportamento, carga-alongamento do material. Os ensaios hidráulicos são pertinentes quando o geotêxtil terá função de drenagem ou filtração. Os mais comuns são a permeabilidade, a transmissividade e a abertura de filtração. Já os ensaios de desempenho são realizados com o geotêxtil inserido no ambiente e com os materiais que ele entrará em contato, o que muda dependendo da obra e de sua utilização (COSTA *et al.*, 2008).

Em projetos de engenharia, os geotêxteis podem exercer a função de separação, proteção, filtração, drenagem, anti-erosão, reforço e impermeabilização (quando impregnado com material asfáltico). Por ter essa ampla funcionalidade, o potencial do geotêxtil está sendo estudado em diferentes áreas da engenharia, buscando facilitar o processo construtivo dos sistemas e sua função final.

A partir da década de 1970, iniciou-se o emprego de geotêxteis no Brasil, o que se intensificou na década de 1990, sendo utilizadas em obras geotécnicas e ambientais com as funções principais de drenagem e filtração (PALMEIRA, 2018). A substituição de uma ou mais camadas de agregados, a menor espessura do filtro, o fato de ter as características controladas e regulares e a facilidade na instalação foram responsáveis pelo aumento do emprego desse material.

Atualmente, os geotêxteis com função de filtração são utilizados em trincheiras, colchões e cortinas drenantes, controle de erosão como revestimento de margens e enroscamentos de contenção, drenagem de rodovias, poços de infiltração, em plantações e barragens de rejeito de mineração.

Independentemente do tipo de trama, para a função de filtro existem alguns critérios que precisam ser avaliados nos geotêxteis para que funcionem adequadamente. Segundo Palmeira (2018), os critérios são:

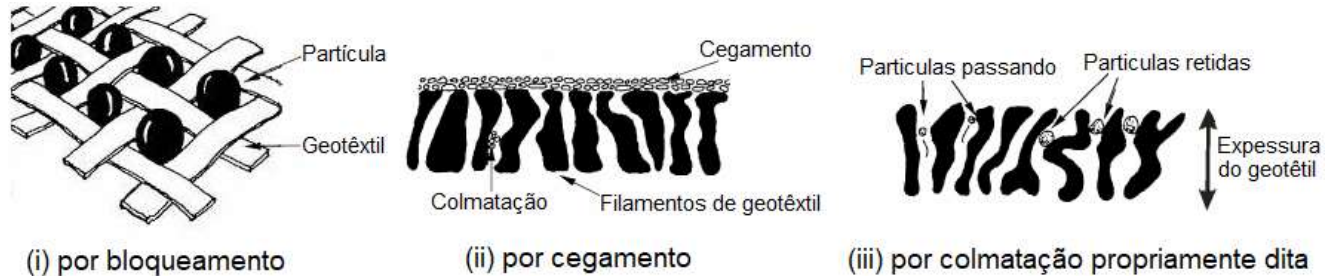
- Critério de retenção: garante a capacidade do geotêxtil de reter as partículas que não são desejáveis no filtrado;

- Critério da permeabilidade: garante a permeabilidade para as substâncias desejáveis através do geotêxtil, sendo a permeabilidade desta deve ser maior que a do substrato que está em contato;
- Critério anticolmatação: garante que o filtro não entre em colmatação, ou seja, que não haja o bloqueio das aberturas do geotêxtil pelas partículas do drenado ou por microrganismos;
- 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.

O fenômeno da colmatação, atribuído por Barroso (2007) e Mortara (2011), como a causa da redução de vazão ao longo do tempo em LD com geotêxtis, acontece devido à obstrução dos poros do geotêxtil pelas partículas menores de lodo. Conforme Silveira (2012), o fenômeno da colmatação afeta diretamente a capacidade drenante do meio poroso, fazendo o fluxo diminuir à medida que os vazios diminuem.

A colmatação causada por ação física está relacionada à ação de um gradiente hidráulico sob a manta geotêxtil provocando um fluxo unidirecional, onde a colmatação pode ocorrer por três formas, como mostra a Figura 3.20, (i) bloqueamento, quando as partículas se posicionam sobre as aberturas do geotêxtil obstruindo-o totalmente ou parcialmente, o que pode acontecer independente do tempo de funcionamento do filtro; (ii) por cegamento, quando partículas finas se agrupam e formam uma camada de baixa permeabilidade sobre a face do geotêxtil; ou (iii) por colmatação propriamente dita, que ocorre quando partículas com diâmetro próximos às aberturas do geotêxtil ficam retidas ao longo da espessura do material (BARROSO, 2007).

Figura 3.20 - Forma de colmatação física do geotêxtil



Fonte: Adaptado de John (1987)² apud Barroso (2007).

A grande maioria das pesquisas realizadas com desaguamento de lodo de ETA em Leito de Drenagem é baseada no uso de geotêxtil não tecido, conforme recomendado por Cordeiro (2001). O Geotêxtil tecido é fabricado com tramas definidas e grande diversidade nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas, que pode ser utilizado em drenagem, separação e filtração. O geotêxtil não tecido também pode ser empregado para drenagem, filtração e separação, além de apresentar melhor durabilidade. O geotêxtil tecido foi utilizado em algumas pesquisas de desaguamento de lodo de esgoto (ETE) também em LD, como Mortara (2011). Na Tabela 3.10 é apresentado um resumo geral das pesquisas brasileiras com uso de Leito de Drenagem, para desaguamento de lodo de ETA.

Tabela 3.10 - Resumo geral das pesquisas brasileira, sobre Leito de Drenagem, que usam geotêxteis

Pesquisador	Ano	Título da pesquisa	Geotêxteis utilizadas
Cordeiro	2001	Processamento de lodos de estações de tratamento de água (ETAs)	<ul style="list-style-type: none"> ● Geotêxtil com gramatura de 150 g/m² (BIDIM) ● Geotêxtil com gramatura de 200 g/m² (BIDIM) ● Geotêxtil com gramatura de 500 g/m² (BIDIM)

² JOHN N. W. M. Geotextiles. New York. Chapman and Hall, 1987.

			<ul style="list-style-type: none"> • Geotêxtil com gramatura de 600 g/m² (BIDIM)
Achon e Cordeiro	2004	Análise Crítica da Implantação de Sistemas Naturais de Remoção de volume de lodo de ETA.	<ul style="list-style-type: none"> • Geotêxtil com gramatura de 600 g/m² (BIDIM)
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	<ul style="list-style-type: none"> • Geotêxtil com gramatura de 150 g/m² (marca não consta) • Geotêxtil com gramatura de 200 g/m² (marca não consta) • Geotêxtil com gramatura de 500 g/m² (marca não consta) • Geotêxtil com gramatura de 600 g/m² (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	<ul style="list-style-type: none"> • Geotêxtil com gramatura de 600 g/m² (marca não consta)
Achon	2008	Leito de Drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água.	<ul style="list-style-type: none"> • Geotêxtil com gramatura de 600 g/m² (BIDIM)
Reis	2011	Estudo de influência de cobertura plástica na remoção de água de lodos de estações de tratamento de água em Leitões de Drenagem	<ul style="list-style-type: none"> • Geotêxtil com gramatura de 150 g/m² (marca não consta) • Geotêxtil com gramatura de 200 g/m² (marca não consta) • Geotêxtil com gramatura de 300 g/m² (marca não consta) • Geotêxtil com gramatura de 400 g/m² (marca não consta) • Geotêxtil com gramatura de 600 g/m² (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 Jardim em Uberlândia – MG	<ul style="list-style-type: none"> • RT-21-BIDIM • RT-26-BIDIM • RT-31-BIDIM

Silveira	2012	Desaguamento de lodo de estações por tratamento de águas por leito de drenagem/secagem com manta geotêxtil	<ul style="list-style-type: none"> ● MACCAFERRI(modelo não consta – gramatura: 600 g/m²)
Kuroda	2014	Drenagem / secagem de lodo de decantadores de ETAs em geotêxtil.	<ul style="list-style-type: none"> ● Geotêxtil com gramatura de 150 g/m² (marca não consta) ● Geotêxtil com gramatura de 300 g/m² (marca não consta) ● Geotêxtil com gramatura de 600 g/m² (marca não consta)
Silveira	2015	Desaguamento do lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem/secagem	<ul style="list-style-type: none"> ● Geotêxtil com gramatura de 600 g/m² (marca não consta)
Cordeiro	2014	Evolução dos Leitos de Drenagem (LD) no Brasil – uma década de avanços	<ul style="list-style-type: none"> ● Geotêxtil com gramatura de 600 g/m² Maccaferri MT 600.
Lustosa	2017	Tratamento e aproveitamento de água de lavagem de filtro em estação de tratamento de água	<ul style="list-style-type: none"> ● Maccaferri - MACDRAIN 2L

Nota ⁽¹⁾: Mortara (2011) utilizou vinte geotêxteis diferentes em sua pesquisa, na tabela acima estão listadas apenas algumas delas. Dentre as citadas, estão as que obtiveram melhores resultados.

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos, optou-se por um sistema de ensaios que permitiu a realização de diferentes formas de avaliação da eficiência do desaguamento de lodo de ETA em LD com uso de diferentes geotêxteis.

Os lodos coletados na ETA de São Carlos foram preparados em diferentes concentrações de sólidos (%ST). Foram preparadas 6 amostras de lodo com teor de sólidos totais próximos de 0,5%; 1%; 1,5%; 2%, 2,5% e 3%, valores estes descritos por Fontana (2004) e Realli (1999) e semelhantes ao que se encontra nas ETAs em escala real, que possuem tecnologia de ciclo completo, sejam estas convencionais ou de alta taxa (decantadores laminares).

A eficiência do desaguamento foi avaliada usando seis tipos de geotêxteis, sendo quatro destes do tipo não tecido (NT) e dois tecido (T). Para cada tipo de geotêxtil foram realizados ensaios com as 6 amostras de lodo com diferentes teores de sólidos totais (%ST), e para cada uma destas amostras foram realizados ensaios variando a altura da camada de lodo nos protótipos de LD em 10cm, 20cm, 30cm, 40cm e 50cm. Assim, foi possível avaliar também a influência de diferentes taxas de aplicação de sólidos (TAS) entre 0,5 e 15 Kg.m⁻².

A TAS depende de alguns fatores diretos como: o teor de sólidos inicial do lodo bruto, o volume de lodo e a área superficial de drenagem. De forma indireta, a TAS também pode ser influenciada pela altura da camada de lodo no leito de drenagem.

Sendo assim, os ensaios foram conduzidos de forma a avaliar a influência de múltiplos fatores na eficiência no desaguamento de lodo de ETA em LD, tais como: condições iniciais do lodo bruto, altura da camada de lodo (carga hidráulica), TAS e o tipo de geotêxtil utilizado.

Esta pesquisa pode ser dividida em 5 etapas de desenvolvimento, que serão detalhadas nos itens seguintes:

1. Montagem e validação do sistema de desaguamento de LD, com aquisição de dados de vazão e equipamentos de mediação e controle (conforme item 4.1);
2. Coleta e preparação das amostras de lodo (conforme item 4.2);
3. Ensaio de Desaguamento no Sistema de Leito de Drenagem (LD) (conforme item 4.3);
4. Caracterização das amostras de lodo e geotêxteis (conforme item 4.4);
5. Análise dos resultados dos ensaios de desaguamento de forma individual e combinada, com sistematização dos resultados e análise estatística (conforme item 4.5).

4.1 EQUIPAMENTO PARA OS ENSAIOS – CONSTRUÇÃO E IMPLANTAÇÃO

Os ensaios de desaguamento em Leitos de Drenagem em escala laboratorial realizados por Barroso (2007), Reis (2011), Silveira (2012) e Santos (2012) evidenciam a necessidade de estudos em escala de bancada, passíveis de servirem de subsídio para a elaboração de projetos de leitos de drenagem em escala real. Nesse sentido, os leitos de drenagem em escala reduzida devem representar o mais fielmente possível os fenômenos da drenagem observados em Leitos de Drenagem em escala real.

Conforme observado na seção 3.6.1, tanto nos experimentos de Silveira (2012) como nos experimentos de Reis (2011) e Barroso (2007), verifica-se grande influência da disposição do geotêxtil na lateral do confinamento do lodo durante a drenagem. A diferença nos tempos de drenagem e qualidade do drenado nos ensaios com os mesmos parâmetros entre os leito piloto e o leito em escala reduzida evidenciados por Silveira (2012) corroboram essa influência lateral da manta, onde na escala reduzida verifica-se apenas a existência de fluxo normal ao plano da manta, enquanto na escala piloto pode-se verificar a possibilidade de fluxo no plano da manta e, conseqüente,

menor tempo de extinção da lâmina líquida em comparação com o ensaio com apenas fluxo normal, onde foi observado um tempo de drenagem 50% mais rápido no protótipo piloto com possibilidade de escoamento no plano do geotêxtil.

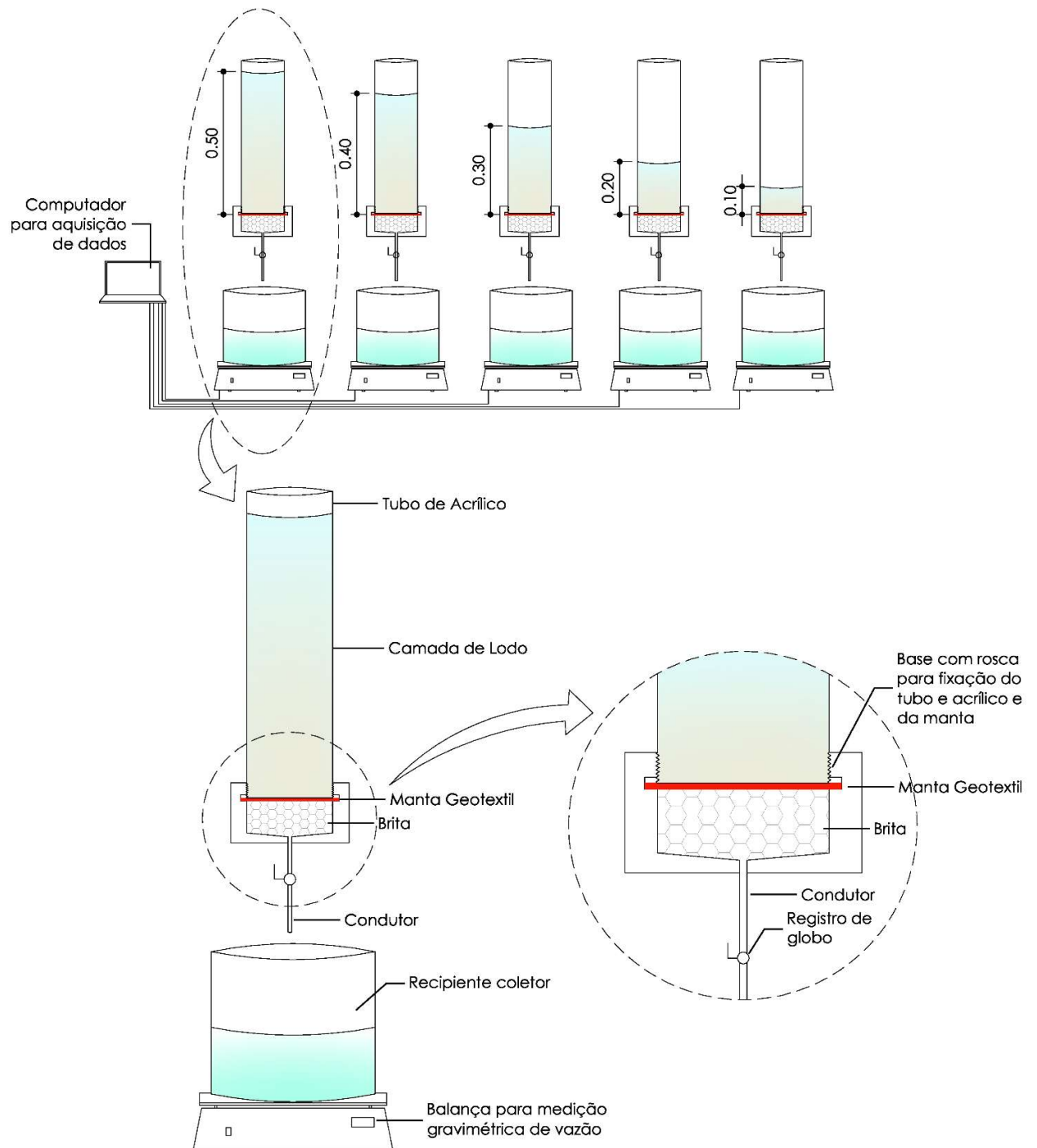
O leito de secagem modificado por Cordeiro (2001) recebeu a denominação de Leito de Drenagem e a tipologia deste leito em escala real, exposto na seção 3.6.2, evidencia que a área de fundo do leito, onde acontece o fluxo normal ao geotêxtil, é muito maior do que a área lateral. Nesse sentido, buscando maior representatividade do fenômeno da drenagem em escala real em escala de bancada, e semelhante ao proposto por Silveira (2012) e Santos (2012) em seu LD de escala de bancada, propôs-se nessa pesquisa a utilização de equipamento apenas com fluxo normal ao geotêxtil. É importante mencionar que a transmissividade no processo de desaguamento de lodo de ETA é um fenômeno com potencial de realização de estudos posteriores, visto que apresenta vantagens, como maior velocidade da drenagem, e pode viabilizar a concepção de novas tipologias de leitos de drenagem.

4.1.1 Sistema de Leito de Drenagem em escala de bancada

O sistema de Leitos de Drenagem propostos nessa pesquisa é composto por cinco tubos de acrílico ($D=150\text{mm}$), preenchido com minibolas de vidro (tipo bolas de gude) no fundo (altura de 4 cm) que servem como meio suporte para o geotêxtil e percolação da água livre drenada. O tubo condutor de cada LD conduzirá o fluxo a um recipiente disposto sobre uma balança conectada a um sistema de aquisição de dados.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 tem-se o esquema e fotografia, respectivamente, do Sistema de Leito de Drenagem (LD) construído para esta pesquisa, com medição automatizada e aquisição de dados de vazão, para desaguamento de lodo de ETA.

Figura 4.1 - Esquema de instalação e detalhe do Sistema de desaguamento de lodo em Leito de Drenagem (LD)



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 4.2 - Foto do Sistema de desaguamento de lodo em Leito de Drenagem (LD) utilizado nesta pesquisa



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

O protótipo foi concebido de forma a possibilitar a avaliação de 5 alturas de camada de lodo em um mesmo ensaio. Portanto, para cada ensaio, foram realizadas 5 drenagens, com 5 alturas de camada de lodo distintas.

4.1.2 Medição de Vazão dos ensaios de desaguamento em LD

Antes do início de cada ensaio foram coletadas amostras do lodo, preparadas conforme será apresentado no item 4.2.1, para verificar o valor do teor de sólidos inicial (%ST). Este valor (%ST) foi utilizado também para calcular a Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) usada em cada ensaio, conforme item 4.1.3.

Durante a realização dos ensaios foi medida a vazão de drenagem de forma contínua, e devido à grande amplitude da faixa de vazões observadas em ensaios preliminares, com o objetivo de medir com maior precisão as vazões drenadas, para esse trabalho foi utilizado sistema gravimétrico de medição. Para tanto, o fluxo

drenado foi conduzido até recipientes dispostos sobre balanças e os dados de variação de massa foram registrados a cada minuto do experimento com equipamento de aquisição de dados. Com a divisão entre a variação da massa em um intervalo de tempo (Δt), dividida pela massa específica da amostra (ρ), tem-se a *vazão* média do intervalo Δt analisado, assim como o cálculo para determinação dos volumes acumulados e alturas de lodo em função do tempo, até finalizar a drenagem.

Assim, foram medidas as vazões do drenado e determinado o percentual de volume de drenado de água livre em função do tempo, conforme Equação 4.1.

$$Q = \frac{\Delta m}{\Delta t \times \rho \times A} \quad (4.1)$$

Sendo:

Q ($L \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) – *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 líquido drenado.

Δt (min) – Intervalo de tempo.

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

4.1.3 Qualidade do líquido drenado e lodo do desaguado

A qualidade do líquido drenado foi analisada durante as primeiras horas de ensaio, até finalizar a drenagem. Foram coletadas amostras do líquido drenado para verificar a qualidade (cor aparente, turbidez e pH) nas primeiras três horas (1min, 10min, 30min, 60min, 120min e 180min), ou seja, seis medições para cada altura inicial de lodo, totalizando 30 (6x5) medições por parâmetro para cada ensaio.

Os métodos usados para caracterização dos resíduos e drenados (pH, turbidez, cor aparente e teor de sólidos totais) seguiram métodos preconizados pela APHA/AWWA/WEF (2001).

O teor de sólidos do lodo desaguado foi medido após o fim da drenagem, ou seja, ao cessar o fluxo de cada leito.

Similarmente ao que foi proposto por Silveira (2012) os drenados foram divididos em três condições, possibilitando a sistematização dos resultados em relação à qualidade da água drenada, avaliando-se o parâmetro de turbidez. Estas três condições estão descritas a seguir:

- **Condição I:** drenados com valores de turbidez inferiores à 40 uT, com padrão similar ao estabelecido para corpos de água doce Classe I segundo a Resolução 357/05 do Conama;
- **Condição II:** drenados com valores de turbidez inferiores à 100 uT, com padrão similar ao estabelecido para corpos de água doce Classe II segundo a Resolução 357/05 do Conama;
- **Condição III:** drenados com valores de turbidez inferiores a 10 uT, considerando a possibilidade de reaproveitamento da água drenada no sistema de produção de água da própria ETA.

Além do enquadramento proposto por Silveira (2012) referente à turbidez, neste trabalho foi aferida a porcentagem dos drenados com valores de cor aparente inferiores a 75 uH, com padrão similar ao estabelecido para corpos de água doce Classe II e III, segundo a resolução 357/05 do Conama.

4.1.4 Taxas de Aplicação de Sólidos (TAS)

A taxa de aplicação de sólidos refere-se à quantidade de sólidos totais secos em kg aplicados em 1 m² de área do LD, calculada através da Equação 4.2. Conforme Silveira (2012), considerou-se para efeito de cálculo a massa específica do lodo igual a 1,0g.cm⁻³.

$$TAS = \frac{V \cdot \left(\frac{\%ST}{100}\right)}{A} \cdot \rho \quad (4.2)$$

Sendo:

TAS ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) – Taxa de aplicação de sólidos.

%ST – Adimensional

A (m^2) – Área de aplicação do lodo

V (m^3) – Volume do lodo

ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) – Massa específica do lodo = $1000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

4.2 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE LODO

Para a realização dos ensaios de desaguamento foram coletadas amostras de lodo na Estação de Tratamento de Água (ETA) de São Carlos (SP), que possui tecnologia de tratamento de água convencional de ciclo completo e utiliza sulfato de alumínio como coagulante.

Todo o lodo utilizado na pesquisa foi coletado diretamente do decantador durante a realização do processo de limpeza. Devido à diferença de tempos de sedimentação das partículas ao longo do decantador em função da diferença de tamanhos, tomou-se o cuidado de realizar a coleta do lodo em pontos distintos da longitudinal do decantador, proporcionando maior representatividade das amostras coletadas. Devido ao grande volume de lodo utilizado na pesquisa, este foi coletado em duas campanhas ao longo da realização dos experimentos. Foram realizadas duas coletas de 950 Litros, totalizando 1900 litros, a primeira coleta em agosto de 2019 e a segunda coleta em setembro de 2020.

Verificou-se que a concentração de sólidos do lodo coletado na ETA de São Carlos foi em torno de 9% para a primeira campanha de coleta, e em torno de 7% para a segunda campanha de coleta. Acredita-se que o intervalo de tempo de 6 meses ou mais entre a limpeza dos decantadores seja o motivo para a compactação do lodo no fundo dos decantadores e, conseqüentemente, o alto teor de sólidos encontrados nas

duas campanhas de coleta de amostras, conforme ilustra a Figura 4.3, durante a coleta de amostras para outra pesquisa em 2015, durante a limpeza deste decantador para remoção do lodo nesta mesma ETA e a Figura 4.4 (a) tirada durante a primeira campanha de coleta.

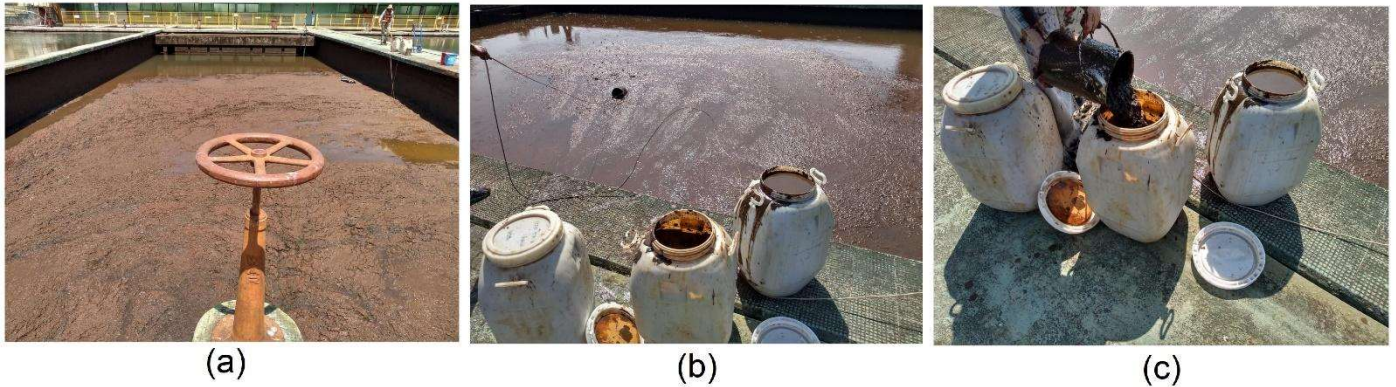
Além do lodo, foi coletada água diretamente do decantador em operação a fim de diluir o lodo com alta concentração de sólidos. Na Figura 4.4 são apresentadas imagens da primeira campanha de coleta de lodo na ETA.

Figura 4.3 - Lodo acumulado no decantador da ETA de São Carlos durante a limpeza para remoção do lodo



Fonte: Achon (2015).

Figura 4.4 - Coleta de lodo na ETA de São Carlos - (a) Decantador no momento da limpeza. (b) Coleta do lodo do decantador. (c) Despejo do lodo nas bombonas para armazenamento



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

4.2.1 Preparação das amostras

Para atingir as concentração de sólidos totais propostas de 5.000 mg.L^{-1} , 10.000 mg.L^{-1} , 15.000 mg.L^{-1} , 20.000 mg.L^{-1} , 25.000 mg.L^{-1} e 30.000 mg.L^{-1} , referentes aos teores de sólidos totais (%ST) de 0,5%; 1,0%; 1,5%; 2,0%; 2,5% e 3,0% respectivamente, houve a necessidade de diluição do lodo coletado usando água do decantador da ETA.

A diluição foi realizada conforme etapas (a), (b) e (c) da Figura 4.6. Na etapa (a), com a finalidade de homogeneizar a amostra, o lodo coletado do decantador, com %ST de aproximadamente 9,0% para a primeira coleta e de aproximadamente 7,0% para a segunda. Foi peneirado conforme ilustrado na Figura 4.5. Observou-se a retenção de matéria orgânica grosseira presente, como pedaços de folhas, possivelmente advindas da vegetação existente nos arredores do decantador. Em seguida, na etapa (b), com finalidade de permitir o manuseio experimental do lodo nos processos posteriores, o lodo foi diluído com água do decantador até o ponto de fluidez, em geral com %ST da ordem de 6,0%. Na etapa (c), uma fração do lodo com %ST de 6,0 foi novamente diluído com água do decantador até atingir as concentrações de sólidos totais pré-definidas. Sendo que o critério para aceitação da amostra foi a variação de uma casa decimal com relação à porcentagem de sólidos

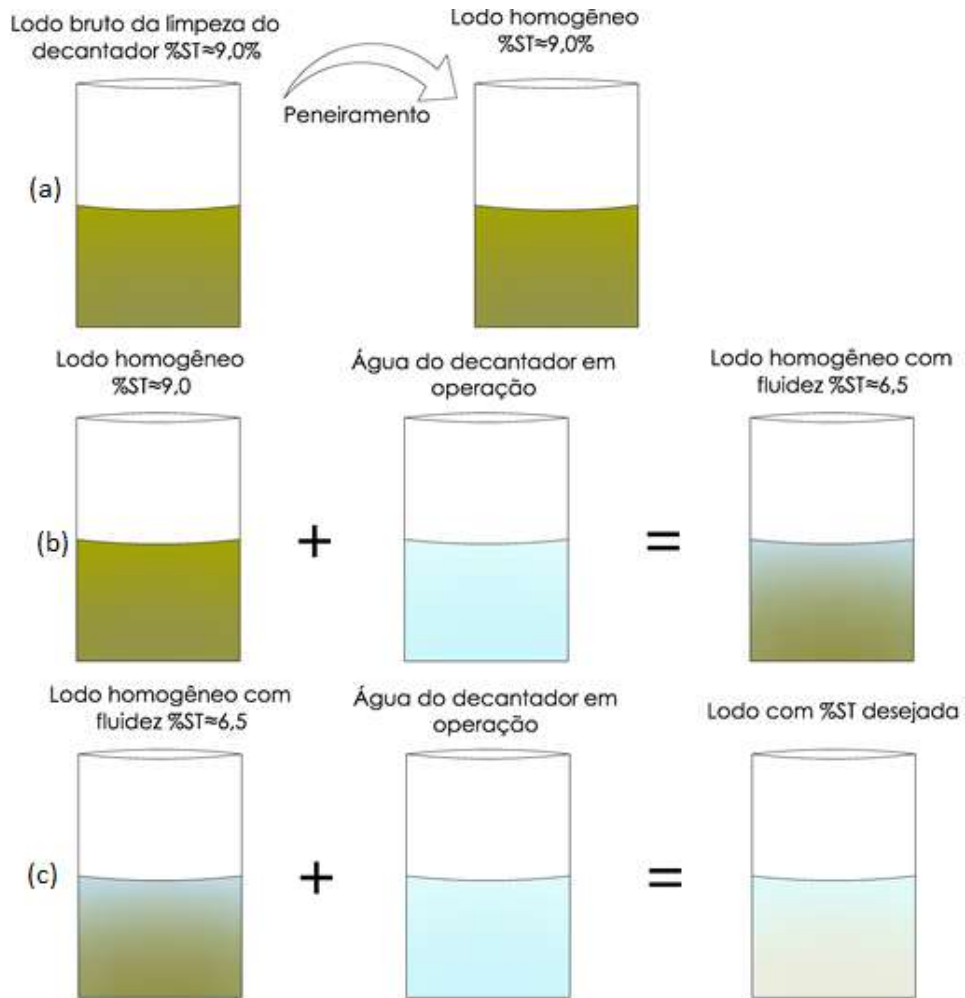
requerida, ou seja, para a concentração de %ST de 1,0 aceitou-se amostras com sólidos totais entre 0,9% e 1,1%.

Figura 4.5 - Peneiramento do lodo bruto com %ST em torno de 9,0%.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 4.6 - STYLEREF 1 \s 4. SEQ Figura * ARABIC \s 1 6 - Etapas de preparação das amostras de lodo com concentração se sólidos pré-definidas



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

A quantidade de água necessária para a diluição da amostra foi calculada de acordo com a equação 4.3. Conforme adotado por Silveira (2012), a massa específica do lodo foi considerada igual à da água, com valor de 1000 kg.m⁻³.

$$M_{\text{água}} = M_{\text{lodo inicial}} \cdot \left(\left(\frac{\%ST_i}{\%ST_f} \right) - 1 \right) \quad (4.3)$$

Sendo:

$M_{\text{água}}$ (kg) - Massa de água a adicionar.

$M_{lodo\ inicial}$ (kg) - Massa de lodo antes da diluição.

$\%ST_i$ - Porcentagem de sólidos totais do lodo antes da diluição.

$\%ST_f$ - Porcentagem de sólidos desejado.

Em geral, a metodologia adotada para a obtenção da concentração de sólidos mostrou-se bastante eficiente, visto que após todas as diluições realizadas foram verificados se a %ST desejada havia sido alcançada. Para isso, amostras do resíduo foram coletadas em triplicata e levadas à estufa até a estabilização da massa, observou-se diferenças entre %ST desejada e a %ST alcançada da ordem de %ST 0,02 para mais ou para menos.

4.3 ENSAIOS DE DESAGUAMENTO NO SISTEMA DE LD

Para avaliação do desaguamento foram realizadas medições da vazão de drenagem, do volume drenado, concentração de sólidos final do resíduo retido nos geotêxteis, além de coleta de amostra do líquido decantado (sobrenadante) sobre os leitos.

O sistema de LD utilizado nesta pesquisa permitiu a avaliação simultânea de 5 alturas de camada de lodo no mesmo ensaio, ou seja, em um mesmo ensaio foram realizadas 5 drenagens, com diferentes alturas de camada de lodo iniciais de 10cm, 20cm, 30cm, 40cm e 50cm.

Os ensaios foram organizados considerando 6 teores de sólidos (%ST) e 6 geotêxteis, totalizando 36 ensaios, que foram realizados em duplicata, um total de 72 ensaios. Em cada ensaio, foram realizadas 5 drenagens, com 5 alturas de camada de lodo distintas, totalizando 360 drenagens. Devido ao volume total de lodo necessário para a realização dos ensaios, duas campanhas de coleta de lodo foram realizadas, sendo que se realizaram as primeiras 180 drenagens com as 180 distintas combinações dos parâmetros de entrada, com lodos da primeira campanha de coleta de amostras, e a duplicata, com lodos da segunda campanha de coleta.

Após a coleta, as amostras de lodo de ETA foram preparadas conforme exposto no item 4.2.1, de modo a atingirem teor de sólidos pré-fixados de 0,5%; 1%; 1,5%; 2%; 2,5%; 3%. Para cada amostra preparada usando um tipo de geotêxtil pré-definido, foram aplicados diferentes volumes do lodo no protótipo de LD, cujo valor foi determinado em função da altura da camada de lodo: 10cm, 20cm, 30cm, 40cm e 50cm, de acordo com a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Sistematização dos ensaios de desaguamento para um tipo de geotêxtil

Ensaio	ST(%)(¹)	Altura da camada de lodo no LD (cm)	Volume estimado (litros)	TAS estimada(²) (Kg.m ⁻²)
1	0,5	10	1,85	0,5
		20	3,75	1
		30	5,60	1,5
		40	7,47	2
		50	8,52	2,5
2	1	10	1,85	1
		20	3,75	2
		30	5,60	3
		40	7,47	4
		50	8,52	5
3	1,5	10	1,85	1,5
		20	3,75	3
		30	5,60	4,5
		40	7,47	6
		50	8,52	7,5
4	2	10	1,85	2
		20	3,75	4
		30	5,60	6
		40	7,47	8
		50	8,52	10

5	2,5	10	1,85	2,5
		20	3,75	5
		30	5,60	7,5
		40	7,47	10
		50	8,52	12,5
6	3	10	1,85	3
		20	3,75	6
		30	5,60	9
		40	7,47	12
		50	8,52	15

NOTA: ⁽¹⁾ Valor pré-fixado (estimado) para preparação das amostras de lodo (diluição ou adensamento). O teor de sólidos ST% real de cada amostra será medido antes da realização de cada ensaio.

⁽²⁾ A Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) de cada ensaio será calculada (conforme item 4.1.3 - equação 4.2) em função do teor de sólidos real (ST%) determinado em cada amostra de lodo preparada (Item 4.2.1).

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Na Figura 4.7 tem-se a relação dos ensaios que foram realizados com cada tipo de geotêxtil estudado, com o intuito de avaliar o desaguamento de lodo em diferentes condições: teor de sólidos inicial (%ST); altura de cada de lodo, volume de lodo e TAS.

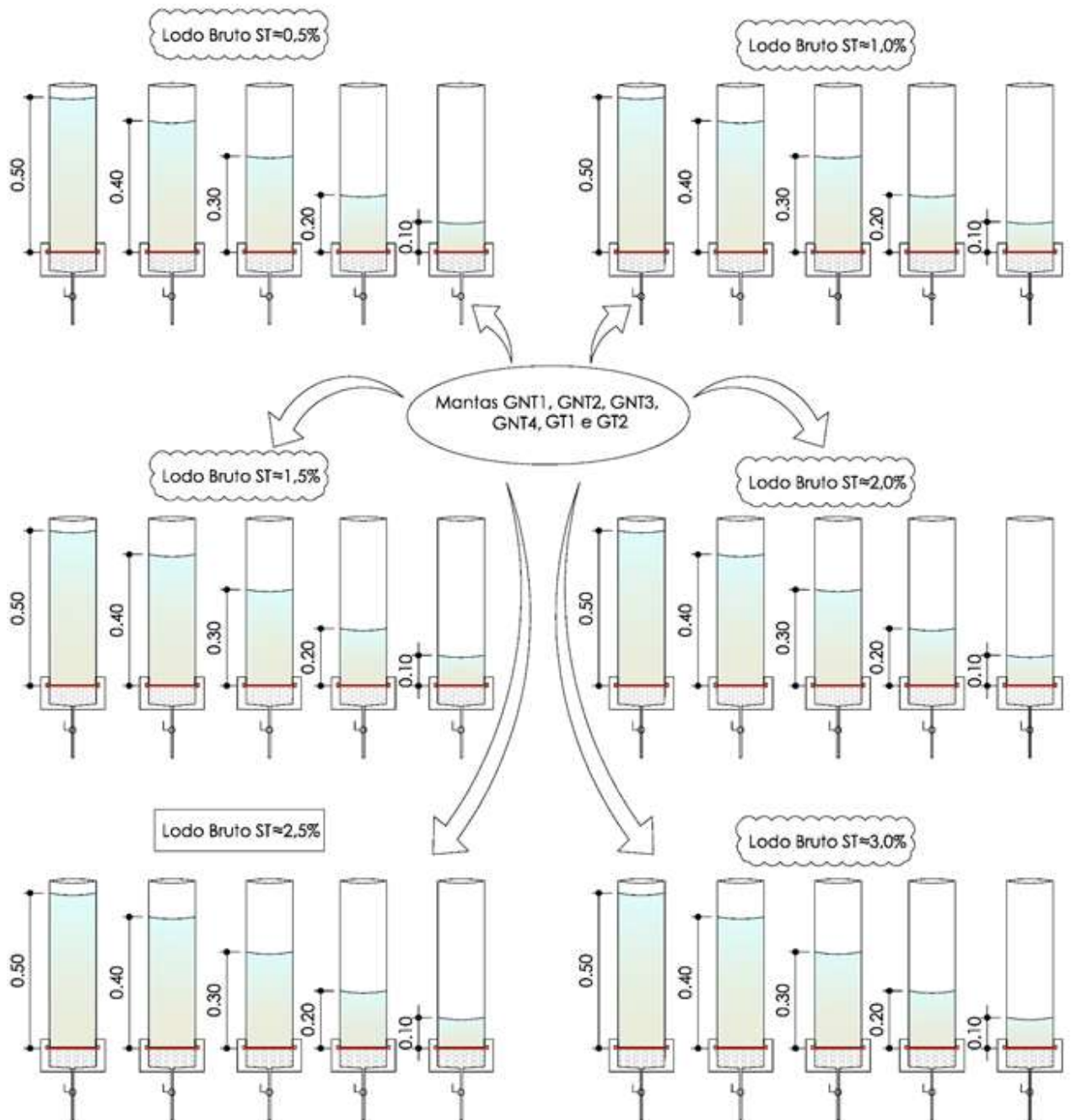
Os ensaios foram realizados em ordem crescente de teor de sólidos totais, de 0,50% até 3,0%, as amostras foram preparadas em dois recipientes de 100 litros cada, totalizado volume de lodo suficiente para a realização dos 6 ensaios com uma mesma %ST para os seis geotêxtis propostos. Após cada ensaio, os geotêxtis foram substituídos, sendo que ao término da bateria de ensaios com o mesmo teor de sólidos (%ST) e início da seguinte, novos geotêxtis foram utilizados.

Após a finalização de cada ensaio, amostras do lodo retido nos LDs foram coletadas para a medição do teor de sólidos totais do lodo após drenagem.

Conforme exposto na seção 4.1.2, os parâmetros de qualidade do drenado foram medidos nos primeiros 180 min de cada ensaio, após esse período as medições do fluxo do drenado continuaram sendo realizadas, até o termino do fluxo de água

livre, caracterizado também pela extinção da água livre sobre o LD, ou até a interrupção do ensaio para a preparação do equipamento para a realização do próximo ensaio, sendo que o tempo de medição dos fluxos do drenado foi geralmente de 48 horas. Após esse período, para os leitos onde ainda havia a presença de água livre decantada, amostras foram coletadas para a medição dos mesmos parâmetros de qualidade para os drenados, conforme exposto na seção 4.1.2.

Figura 4.7 - Esquema ilustrativo dos ensaios de desaguamento de lodo no Sistema de Leito de Drenagem para cada tipo de manta, realizados em duplicata (dimensões em centímetro)



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

4.4 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS E AMOSTRAS DE LODO

O programa experimental contempla a utilização de 6 (seis) diferentes tipos de geotêxteis, sendo 4 destes não tecidos e 2 tecidos. Na Tabela 4.2 tem-se os geotêxteis utilizados e avaliados nesta pesquisa.

Com a finalidade de verificar a influência dos parâmetros característicos dos geotêxteis no processo de desaguamento de lodo de ETA em LD, foram realizados ensaios para a caracterização dos geotêxteis, com auxílio de uma aluna de Iniciação Científica, com a mesma orientadora desta pesquisa. A compilação dos ensaios realizados pode ser observada na Tabela 4.3

Tabela 4.2 - Geotêxteis utilizados nesta pesquisa

Fabricante	Geotêxtil	GRAMATURA
OBER	GEFORT 100% PES /L. 2,30 / GR 600 - CIN (100% POLIESTER)	600 g.m ⁻²
OBER	GEFORT 100% PES /L. 2,30 / GR 500 - CIN (100% POLIESTER)	500 g.m ⁻²
OBER	GEFORT 100% PES /L. 2,30 / GR 400 - CIN (100% POLIESTER)	400 g.m ⁻²
OBER	GEFORT 100% PES /L. 2,30 / GR 300 - CIN (100% POLIESTER)	300 g.m ⁻²
HUESKER	BASETRAC @WOVEN 55/55 UV	tecido
HUESKER	HaTe ® 105/105 DW	tecido

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Tabela 4.3 - Ensaios realizados para caracterização dos geotêxteis

Caracterização	Ensaio	Unidade	Método
Parâmetros	Gramatura	g/m ²	ABNT NBR ISO 9864
Físicos	Espessura	mm	ABNT NBR ISO 9863

	Abertura de filtração ($O_{95\%}$)	mm	ABNT NBR ISO 11058 ⁽¹⁾
Parâmetros Hidráulicos	Permissividade	s^{-1}	ABNT NBR ISO 11058
	Permeabilidade normal	mm/s	ABNT NBR ISO 11058

Nota (1): consulta direta aos fabricantes dos geotêxteis, pois não puderam ser realizados em laboratório devido a temporária interrupção das atividades deste laboratório no ano de 2020.

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Para avaliar a superfície e estrutura física e/ou morfologia dos geotêxteis e das partículas de lodo retidas nos geotêxteis após o desaguamento, foram realizados ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com metodologia apresentada no item 4.4.2.

Além da caracterização dos geotêxteis, foram realizados ensaios para avaliar as micro e macropropriedades dos lodos utilizados nessa pesquisa, conforme recomendado por Barroso (2007). Estes foram realizados para as duas campanhas de coleta de lodo, os ensaios foram realizados com amostras de lodo bruto, antes de serem diluídas com água dos decantadores da ETA de São Carlos para a obtenção dos teores de sólidos totais desejados. A síntese das propriedades usadas para caracterização do lodo nesta pesquisa pode ser observada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Micro e macropropriedades e métodos usados na caracterização dos lodos de ETA utilizados na pesquisa

Propriedades do Lodo	Método
Distribuição de tamanho de partículas	SEDIGRAPH (esfera de diâmetro equivalente)
Estrutura cristalina	Difração de Raios X (CCDM/UFSCar)
Morfologia das partículas	MEV – microscopia eletrônica de varredura (CCDM/UFSCar)
Avaliação qualitativa da fração sólida	EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (CCDM/UFSCar)
Série de sólidos	APHA/AWWA/WEF, 2005, EAA

Carbono orgânico total (lodo)	POP-SL 010
pH	APHA/AWWA/WEF, 2005, EAA
Metais (Al, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn)	APHA/AWWA/WEF, 2005, EAA

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Os ensaios para determinação do Carbono orgânico Total, concentrações de metais presentes no lodo e Série de Sólidos foram contratados e realizados em laboratório externo (Venturo Análises Ambientais) acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro para ensaios NBR ISO/IEC 17025, seguindo os métodos preconizados nesta pesquisa. Os ensaios de distribuição de tamanho das partículas, identificação de estrutura cristalina, morfologia e avaliação qualitativa dos lodos e geotêxteis, foram realizados no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da UFSCar (CCDM/UFSCar). Os ensaios terceirizados foram contratados com recursos provenientes do Projeto Universal 01/2016 – Faixa A do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) - Processo Nº 424639/2016-5, sendo que o desenvolvimento desta pesquisa faz parte desse projeto, que financiou a construção e implantação deste sistema de leito de drenagem para desaguamento de lodo.

4.4.1 Distribuição granulométrica por atenuação de raios-x (SEDIGRAPH)

O ensaio de distribuição granulométrica das partículas sólidas do lodo foi realizado para as amostras de lodo bruto da primeira e segunda campanha de coleta.

Esse ensaio exige que o material a ser analisado esteja em suspensão diluída (1% de sólidos por volume). Para isso, o resíduo a ser analisado foi seco em estufa, passado na peneira de nº100–ASTM e a densidade real das partículas foi determinada pela técnica de psicometria de gás.

A análise do tamanho de partículas finas (0,1 - 300 μm) foi obtida a partir das diferentes taxas de sedimentação em um meio líquido. Esta técnica utiliza o campo gravitacional ou um campo de força centrífuga como força eletromotriz da sedimentação e utilizam a dependência da velocidade de sedimentação com o tamanho das partículas descrito pela lei de Stokes, onde uma partícula rígida em suspensão em um fluido sofre a ação da gravidade e a força de sustentação do meio, ambos são proporcionais ao volume da partícula e a aceleração da gravidade. O sedígrafo combina lei de Stokes com absorção de Raio-X analisando a taxa de sedimentação das partículas usando a absorção de raios-X.

Em um primeiro momento, o sedígrafo mede a transmitância de raios X através da suspensão da amostra em movimento vertical, de modo a não permitir nenhuma sedimentação. Assim, o equipamento interrompe o movimento da suspensão da amostra e a sedimentação começa a ocorrer. Por fim, a transmitância de raios X é medida novamente nas diferentes posições na cela e nos tempos pré-selecionados com base na lei de Stokes.

4.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X – MEV/EDS

Com o objetivo de avaliar qualitativamente, verificar a morfologia das partículas de lodo, a tipologia e arranjo das fibras dos geotêxtis, além de poder avaliar a interação entre o geotêxtil e o lodo, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (MEV/EDS) para as amostras de lodo das duas campanhas de coleta, e nos seis tipos de geotêxtis utilizados nesta pesquisa. Os geotêxtis foram avaliados limpos, conforme fornecidos pelo fabricante, e após serem submetidos ao desaguamento do lodo em LD. Foram preparadas amostras do geotêxtil usado após a retirada da torta de lodo ao qual já se observava o processo de retenção dos sólidos devido ao desaguamento por evaporação. Na figura 4.8 pode-se observar o estágio da retração do lodo após 4 dias do fim da drenagem e imediatamente antes da retirada da amostra para a realização do ensaio.

Figura 4.8 - Retração do lodo antes da retirada das amostras dos geotêxteis para realização dos ensaios MEV/EDS



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Durante a incidência de um feixe de elétrons em uma amostra sólida ocorrem alguns processos de interação entre eles. Os diversos tipos de elétrons refletidos e os elétrons absorvidos são utilizados na microscopia eletrônica de varredura. O feixe incidente modula em x e em y de modo a cobrir uma área retangular, de maneira que o aumento do aparelho é simplesmente a relação entre a área da tela e essa área varrida na superfície da amostra. Assim, quanto menor a área varrida maior o aumento. Raios- X também são gerados nessa interação entre elétron e matéria, sendo que os mesmos são utilizados para identificar qualitativamente os elementos químicos presentes nas amostras.

A análise foi realizada pelo MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) modelo Inspect S50 da FEI, no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Matérias da UFSCar.

4.4.3 Difractometria de Raios X (Ensaio de Difração de Raios X)

Os ensaios de difratometria de raios X visaram identificar possíveis estruturas cristalinas nas amostras de lodo da primeira e segunda campanha de coleta.

De acordo com a metodologia de análise por difração de raios X (DRX), o sistema utiliza equipamentos de Raios X, com amostra em pó, cujo diagrama de refração é obtido através de registro gráfico com contador Geiger, chamado de difratograma de Raios X. Para a realização dos ensaios, o resíduo foi seco em estufa e passado na peneira N° 100-ASTM, em seguida a amostra em pó foi colocada e fixada em lâmina de vidro. O aparelho de Raios X foi acionado sobre a amostra e o difratograma registrado no contador. Os ensaios foram feitos no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da UFSCar. As amostras foram submetidas a ensaios de difratometria de raios X num difratômetro Bruker modelo D8 Advance ECO com âncora rotatório, utilizando as seguintes condições: varredura entre 10 e 80° em 2θ , com passo de 0,02° e 0,5s por passo, 40 kV e 25 mA, tubo de Cobre.

4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESAGUAMENTO EM LD

A análise dos resultados dos ensaios de desaguamento de lodo de ETA em Leito de Drenagem (LD) foi sistematizada em duas abordagens:

Abordagem 1: **Análise individual e combinada dos resultados dos ensaios**, considerando as observações dos parâmetros de qualidade nos primeiros 180 minutos de ensaio e considerando as observações de vazão durante todo o período de medições ou até o término do fluxo de água livre. Tal abordagem possibilitou a observação de detalhes do fenômeno, através de análises individuais e pontuais de alguns ensaios. Através de análises combinadas de alguns resultados foi possível comparar a influência da variação dos múltiplos parâmetros de entrada no processo de drenagem ao longo dos ensaios. Esta abordagem está detalhada no item 4.5.1.

Abordagem 2: **Sistematização dos resultados dos ensaios**, considerando critérios práticos de vazão e de enquadramento dos drenados quanto aos parâmetros de qualidade, a fim de possibilitar a avaliação global da influência da variação dos

parâmetros iniciais na qualidade e quantidade dos drenados. Esta abordagem está detalhada no item 4.5.2.

4.5.1 Análise individual e combinada dos resultados dos ensaios

Nessa abordagem de análise, os resultados dos ensaios foram sistematizados em gráficos que apresentam os valores dos parâmetros de qualidade (Cor aparente, Turbidez e pH) e de quantidade (porcentagem de líquido drenado, taxa de vazão e volume drenado acumulado), medidos ao longo do período de observação de cada ensaio.

Santos (2012) observou que quando registrava a vazão de $1,67\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, atribuída por Barroso (2007) como sendo a vazão de final da drenagem, ainda haviam volumes consideráveis de lodo no LD em seus ensaio. Sendo assim, em consonância com Silveira (2012), Santos (2012) considerou como final da drenagem o término do fluxo de água livre. Cabe observar que Barroso (2007) atribuiu a vazão de $1,67\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ como a vazão de final da drenagem para um LD com tipologia peculiar, ou seja, com nítida contribuição lateral do geotêxtil na drenagem. Nos experimentos de Santos (2012) e Silveira (2012), em escala de bancada, a tipologia dos LD utilizada em seus ensaios evidenciou apenas fluxo normal ao plano do geotêxtil. No entanto, seus leitos de drenagem possuíam diâmetros distintos e ambas apresentam seus resultados de vazão em $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ diferentes, o que torna difícil a comparação entre seus resultados. Sendo assim, buscando padronização na apresentação dos dados e para estabelecer critérios para elaboração de projetos de LD em escala real, propõe-se nessa pesquisa a utilização de **taxa de drenagem** por metro quadrado de geotêxtil, expressa em $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, que representa a vazão drenada no tempo de um minuto dividida pela área efetiva de drenagem do lodo no LD, onde está o geotêxtil.

De maneira similar ao que foi proposto para a medição das vazões, o volume dos drenados nos intervalos também foram considerados em função da área de aplicação do lodo, ou seja, o **volume drenado** nos intervalos considerados foi dividido **pela área** efetiva de drenagem do leito e expresso em $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}$.

A análise combinada dos resultados das drenagens tem o objetivo de avaliar a influência da variação de um parâmetro específico ao longo do processo de drenagem. Para isso, foram compilados alguns resultados de drenagens submetidas às mesmas condições para parâmetros que não são o objeto da análise.

A **análise da influência do teor de sólidos (%ST)** foi verificada compilando-se resultados de drenagens submetidas a mesma altura inicial de lodo, mesmo geotêxtil e utilizando lodo da mesma campanha de coleta de amostras.

A **análise da influência da altura de camada de lodo** foi verificada em leitos submetidos a mesma TAS, utilizando os mesmos geotêxtis.

Já a **análise da influência do tipo de geotêxtil** foi verificada comparando-se drenagens submetidas a amostras de lodo com a mesma altura de aplicação e mesmo teor de sólidos totais, conseqüentemente, mesma TAS.

4.5.2 Sistematização dos resultados dos ensaios

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 das diferentes %ST, das diferentes alturas de camada de lodo aplicados e das diferentes TAS no desaguamento em LD para os seis tipos de geotêxtil utilizados. A sistematização dos resultados também permitiu verificar se houve diferenças entre os parâmetros de qualidade e quantidade do drenado, comparando os resultados das drenagens com lodos da primeira e segunda campanha de coleta.

A sistematização proposta considerou o agrupamento das observações nas seguintes variáveis resposta:

- Porcentagem do drenado com Turbidez inferior a 40 uT;
- Porcentagem do drenado com Turbidez inferior a 100 uT;
- Porcentagem do drenado com Turbidez inferior a 10 uT;

- Porcentagem do drenado com Cor aparente inferior a 75 uT;
- Porcentagem drenada em relação ao volume de lodo aplicado;
- Tempo para o término do fluxo de água livre.

Nos próximos subitens, de 4.5.2.1 a 4.5.2.3, estão apresentados como foram considerados a sistematização dos resultados para cada parâmetro de saída avaliado.

4.5.2.1 Qualidade dos drenados

Quanto à qualidade dos líquidos drenados, a influência dos parâmetros foi verificada considerando-se as porcentagens dos drenados que se enquadraram nas condições de turbidez e cor aparentes propostas na seção 4.1.2, com três condições de enquadramento para o parâmetro de turbidez, e uma condição para o parâmetro de cor aparente.

4.5.2.2 Porcentagens drenadas em relação ao volume de lodo aplicado

Foi avaliada a porcentagem drenada final em relação ao volume de lodo aplicado, isto para os leitos que terminaram o fluxo de água livre no período observado, geralmente de 48 horas.

4.5.2.3 Vazão nos leitos

A performance das vazões nos leitos, frente aos distintos parâmetros, foi avaliada considerando-se o tempo necessário para a finalização da drenagem, com o fim do fluxo de água livre percolada pelo LD.

O período de observação dos fluxos para determinação das vazões limitou-se ao período de 48 horas. Para os ensaios em que ainda havia fluxo de água livre após esse período, a taxa de drenagem posterior às medições foi estimada considerando-se a extrapolação dos valores observados nos intervalos finais de cada medição. Com o auxílio do software EXCEL foram geradas equações exponenciais ou logarítmicas buscando coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,95, a fim de estimar essas taxas para cada caso.

Considerando a metodologia adotada para estimar o fim do fluxo de água livre e as escalas temporais observadas na operação dos leitos de drenagem implantados em ETAs, descritas na sessão 3.6.2, a escala de tempo adotada para a avaliação do término das drenagens nos histogramas foi de 12 horas (0,5 dia).

4.5.2.4 *Análise descritiva dos resultados*

Com a finalidade de fazer uma análise descritiva da influência das diferentes condições a que foram submetidos os leitos durante as drenagens, compilou-se em histogramas de frequência os resultados das drenagens, agrupando-os de acordo com os parâmetros analisados.

Para facilitar a análise das distribuições das observações nos histogramas, curvas de distribuição normais foram geradas considerando-se a média e o desvio padrão dos valores observados. Os valores das médias servem para uma avaliação quantitativa preliminar da influência dos parâmetros analisados, e o valor do desvio padrão, indica a aleatoriedade no conjunto de amostras observadas. Nessa análise foram desconsideradas as amostras que apresentaram valores superiores a quatro desvios padrão em relação à média.

4.5.2.5 Teste de normalidade dos dados

A fim de testar se os dados seguem a distribuição Normal realizou-se o teste de Shapiro-Wilk, conforme exposto em Royston (1982). O teste consiste em testar a hipótese de que a amostra tem distribuição normal a partir de uma estatística W . A estatística W do teste é calculada através da equação 4.4.

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_{(i)} - \bar{x})^2} \quad (4.4)$$

Sendo:

x - Valor observado

$$b = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1} \times (x_{(n-i+1)} - x_{(i)}) & \text{se } n \text{ é par} \\ \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{n-i+1} \times (x_{(n-i+1)} - x_{(i)}) & \text{se } n \text{ é ímpar} \end{cases}$$

Então, para realizar o teste de Shapiro-Wilk, deve-se primeiramente formular a hipótese como se segue:

- H_0 : A amostra provém de uma população normal
- H_1 : A amostra não provém de uma população normal

Em seguida, foi necessário estabelecer o nível de significância α , neste caso igual a 0,05. Após isso, calculou-se a estatística do teste utilizando a equação 4.4. A tomada de decisão para saber se rejeita ou não a hipótese nula, em detrimento da hipótese alternativa ao nível de significância α já estabelecido, é dada analisando se a estatística W calculada é maior ou menor que o valor de W definido em uma Tabela de probabilidade de Shapiro- Wilk. Rejeita-se H_0 caso seja menor, ou não rejeita em caso contrário.

4.5.2.6 Correlação entre os parâmetros observados (Correlação de Spearman)

Para quantificar a associação entre as variáveis de entrada e as variáveis de saída, foi realizado o teste não-paramétrico de Spearman, conforme exposto em Kendall (1938), o coeficiente de correlação (ρ) é representado na equação 4.5.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4.5)$$

Sendo:

$d_i = rg(X_i) - rg(Y_i)$ a diferença entre os dois postos de cada observação.

n é número total de observações.

O sinal da correlação de Spearman indica a direção da associação entre X (a variável independente ou variável de entrada, no caso desta pesquisa) e Y (a variável dependente ou variável de saída, no caso desta pesquisa), tendo o intervalo entre -1 e 1. Se Y tende a diminuir quando X aumenta, o coeficiente de correlação de Spearman é negativo, ou seja, indica uma relação linear negativa. Se Y tende a aumentar quando X aumenta, o coeficiente de correlação de Spearman é positivo, ou seja, há uma relação linear positiva. Um coeficiente de Spearman igual a zero indica que não há tendência de que Y aumente ou diminua quando X aumenta.

A correlação de Spearman foi realizada também para as variáveis qualitativas, primeiro chamando os lodos da 1ª e 2ª campanha de coleta como variáveis com os valores 0 e 1. Após isso, foi realizada também uma análise dos geotêxteis, como são variáveis de saída qualitativas com mais de 2 categorias, estes foram transformado para 2 categorias da seguinte maneira:

- Para presença de geotêxtil analisado, chamou-se de variável de 1;
- Chamou-se essa variável de 0 caso contrário.

Esse processo foi feito individualmente para cada geotêxtil.

4.5.2.7 Tratamento estatístico dos dados (Regressão Linear)

A regressão linear é uma técnica que quantifica a relação entre uma ou mais variáveis preditoras e uma variável de resultado. Portanto, é uma técnica boa para prever resultados a partir de valores de entrada, além de verificar a relação entre as variáveis. É condição fundamenta para que uma regressão resulte em um modelo confiável, que se observe a variância dos erros constantes, Montgomery (1992).

O método utilizado nessa pesquisa foi a regressão linear múltipla. Esse método relaciona múltiplas variáveis de entrada com uma única variável resposta. Para o cálculo da estimativa de cada variável, utiliza-se a técnica de quadrados mínimos. Esse método permite calcular qual a estimativa das variáveis para que a linha de regressão tenha um melhor ajuste para os dados observados, minimizando a soma dos quadrados dos desvios verticais de cada ponto para a linha de regressão. Utilizou-se o comando “lm” no software R (software livre para análise de dados) para calcular automaticamente os valores das estimativas, sendo que as análises foram elaboradas com um nível de confiança de 95% e obtido o grau de significância de cada variável pesquisada (p-valor), onde os termos com (p-valor \geq 0,05) não apresentam significância estatística.

Os modelos de regressão utilizados nesse projeto são dados pela seguinte equação 4.6:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 C_i + \beta_4 G_i \quad (4.6)$$

- y é cada variável resposta (fim da drenagem em minuto, porcentagem do drenado em relação ao volume do lodo, porcentagem do drenado com cor aparente inferior a 75 uH e porcentagem do drenado com turbidez inferior a 40 uT).
- β_0 é o intercepto do modelo;
- x_1 é porcentagem de sólidos do lodo aplicado;
- x_2 é a altura da camada de lodo inicial;

- C_1 é 1, se é o lodo da 2° campanha de coleta; 0, caso contrário;
- G_1 1, se é o Geotêxtil NT de 600g.m⁻²; 0, caso contrário;
- G_2 1, se é o Geotêxtil NT 400g.m⁻²; 0, caso contrário;
- G_3 1, se é o Geotêxtil NT 300g.m⁻²; 0, caso contrário;
- G_4 1, se é o Geotêxtil 55/55UV; 0, caso contrário;
- G_5 1, se é o Geotêxtil 105/105DW; 0, caso contrário/
- Já o Geotêxtil NT de 500g.m⁻² e o lodo da 1° campanha de coleta estão inclusos no intercepto quando G_i for 0 para todos os casos e C_1 for 0, pois isso indica que refere-se à amostras de lodo da 1° campanha de coleta, ou seja, para avaliar a significância do geotêxtil NT de 500g.m⁻² e lodo da 1° campanha de coleta é necessário olhar para a significância do intercepto.

A variável Taxa de aplicação de sólidos (TAS) não foi considerada neste modelo de regressão porque está diretamente relacionada à outras duas variáveis, que são a altura da camada de lodo inicial (x_1) e a porcentagem de sólidos do lodo aplicado (x_2) e, portanto, é uma variável dependente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios de desaguamento de lodo de ETA em leito de drenagem, individuais, combinados, através de análise descritiva e após tratamento estatístico.

Os resultados das análises dos parâmetros de caracterização do lodo bruto para as duas campanhas de coleta de amostras e dos seis geotêxteis utilizados nesta pesquisa também serão apresentados nos itens subsequentes.

5.1 ANÁLISE INDIVIDUAL E COMBINADA DAS DRENAGENS AO LONGO DO PERÍODO DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Na Tabela 5.1 tem-se os dados de entrada e o tipo de geotêxtil de cada um dos ensaios realizados, sendo que para cada um destes, variou-se a altura da camada de lodo de 10 a 50cm, gerando 5 (cinco) TAS (Kg/m^2) diferentes para cada ensaio e, portanto, 335 drenagens.

A Figura 5.1 ilustra um dos ensaios realizados e em andamento (após 180 min do início), para um determinado teor de sólidos totais (%ST) e geotêxtil, variando apenas a altura da camada de lodo, sendo 5 alturas 10, 20, 30, 40 e 50 cm, em cada tubo de LD e conseqüentemente 5 TAS diferentes para drenagem.

Figura 5.1 - Fotografia de um dos ensaios realizados, variando a altura da camada de lodo aplicada



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Assim, os ensaios foram organizados considerando os 6 teores de sólidos totais (%ST) de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0% e 6 geotêxteis (2 Tecidos e 4 Não Tecidos), totalizando 36 ensaios, em duplicata, sendo que esta realizada com amostras de lodo da segunda campanha de coleta, que deveriam totalizar 72 ensaios. Porém, como 5 ensaios não puderem ser finalizados, por conta da suspensão temporária das atividades do laboratório de saneamento da UFSCar em 2020 devido à pandemia da COVID-19, no total foram **67 ensaios realizados**. Em cada um deles, foram avaliadas 5 alturas de aplicação de lodo, totalizando **335 drenagens** com parâmetros distintos de entrada.

As 25 drenagens, referentes aos 5 ensaios que não puderam ser replicados (duplicata), para que se completasse o segundo ciclo dos ensaios propostos, foram apenas os ensaios com ST de 3%, para 5 geotêxteis 600 g.m^{-2} , 500 g.m^{-2} , 300 g.m^{-2} , 55/55UV e 105/105 DW e as 5 alturas distintas propostas, resultando em 25 drenagens não realizadas.

Os resultados completos dos 67 ensaios (335 drenagens) realizados estão apresentados no Apêndice na forma de Tabelas e gráficos, sendo que na Tabela 5.1 tem-se um resumo dos 67 ensaios apresentados.

Na Tabela 5.1 é apresentada uma lista dos 67 ensaios realizados com a numeração de páginas como índice para consulta aos gráficos no Apêndice III.

Tabela 5.1 - Resumo dos 67 ensaios de desaguamento com a numeração de páginas como índice para consulta aos gráficos no Apêndice III

Ensaio	Página	Campanha de coleta de lodo	ST%	Geotêxtil	TAS kg.m^{-2} H=10cm	TAS kg.m^{-2} H=20cm	TAS kg.m^{-2} H=30cm	TAS kg.m^{-2} H=40cm	TAS kg.m^{-2} H=50cm
1	246	1°	0,5	600 g.m^{-2} NT	0,5	1	1,5	2	2,5
2	247	1°	0,5	500 g.m^{-2} NT	0,5	1	1,5	2	2,5
3	248	1°	0,5	400 g.m^{-2} NT	0,5	1	1,5	2	2,5
4	249	1°	0,5	300 g.m^{-2} NT	0,5	1	1,5	2	2,5
5	250	1°	0,5	55/55 UV	0,5	1	1,5	2	2,5
6	251	1°	0,5	105/105 DW	0,5	1	1,5	2	2,5
7	252	1°	1	600 g.m^{-2} NT	1	2	3	4	5
8	253	1°	1	500 g.m^{-2} NT	1	2	3	4	5
9	254	1°	1	400 g.m^{-2} NT	1	2	3	4	5
10	255	1°	1	300 g.m^{-2} NT	1	2	3	4	5
11	256	1°	1	55/55 UV	1	2	3	4	5
12	257	1°	1	105/105 DW	1	2	3	4	5
13	258	1°	1,5	600 g.m^{-2} NT	1,5	3	4,5	6	7,5
14	259	1°	1,5	500 g.m^{-2} NT	1,5	3	4,5	6	7,5

15	260	1°	1,5	400 g.m ⁻² NT	1,5	3	4,5	6	7,5
16	261	1°	1,5	300 g.m ⁻² NT	1,5	3	4,5	6	7,5
17	262	1°	1,5	55/55 UV	1,5	3	4,5	6	7,5
18	263	1°	1,5	105/105 DW	1,5	3	4,5	6	7,5
19	264	1°	2	600 g.m ⁻² NT	2	4	6	8	10
20	265	1°	2	500 g.m ⁻² NT	2	4	6	8	10
21	266	1°	2	400 g.m ⁻² NT	2	4	6	8	10
22	267	1°	2	300 g.m ⁻² NT	2	4	6	8	10
23	268	1°	2	55/55 UV	2	4	6	8	10
24	269	1°	2	105/105 DW	2	4	6	8	10
25	270	1°	2,5	600 g.m ⁻² NT	2,5	5	7,5	10	12,5
26	271	1°	2,5	500 g.m ⁻² NT	2,5	5	7,5	10	12,5
27	272	1°	2,5	400 g.m ⁻² NT	2,5	5	7,5	10	12,5
28	273	1°	2,5	300 g.m ⁻² NT	2,5	5	7,5	10	12,5
29	274	1°	2,5	55/55 UV	2,5	5	7,5	10	12,5
30	275	1°	2,5	105/105 DW	2,5	5	7,5	10	12,5
31	276	1°	3	600 g.m ⁻² NT	3	6	9	12	15
32	277	1°	3	500 g.m ⁻² NT	3	6	9	12	15
33	278	1°	3	400 g.m ⁻² NT	3	6	9	12	15
34	279	1°	3	300 g.m ⁻² NT	3	6	9	12	15
35	280	1°	3	55/55 UV	3	6	9	12	15
36	281	1°	3	105/105 DW	3	6	9	12	15
37	282	2°	0,5	600 g.m ⁻² NT	0,5	1	1,5	2	2,5
38	283	2°	0,5	500 g.m ⁻² NT	0,5	1	1,5	2	2,5
39	284	2°	0,5	400 g.m ⁻² NT	0,5	1	1,5	2	2,5
40	285	2°	0,5	300 g.m ⁻² NT	0,5	1	1,5	2	2,5
41	286	2°	0,5	55/55 UV	0,5	1	1,5	2	2,5
42	287	2°	0,5	105/105 DW	0,5	1	1,5	2	2,5
43	288	2°	1	600 g.m ⁻² NT	1	2	3	4	5

44	289	2°	1	500 g.m ⁻² NT	1	2	3	4	5
45	290	2°	1	400 g.m ⁻² NT	1	2	3	4	5
46	291	2°	1	300 g.m ⁻² NT	1	2	3	4	5
47	292	2°	1	55/55 UV	1	2	3	4	5
48	293	2°	1	105/105 DW	1	2	3	4	5
49	294	2°	1,5	600 g.m ⁻² NT	1,5	3	4,5	6	7,5
50	295	2°	1,5	500 g.m ⁻² NT	1,5	3	4,5	6	7,5
51	296	2°	1,5	400 g.m ⁻² NT	1,5	3	4,5	6	7,5
52	297	2°	1,5	300 g.m ⁻² NT	1,5	3	4,5	6	7,5
53	298	2°	1,5	55/55 UV	1,5	3	4,5	6	7,5
54	299	2°	1,5	105/105 DW	1,5	3	4,5	6	7,5
55	300	2°	2	600 g.m ⁻² NT	2	4	6	8	10
56	301	2°	2	500 g.m ⁻² NT	2	4	6	8	10
57	302	2°	2	400 g.m ⁻² NT	2	4	6	8	10
58	303	2°	2	300 g.m ⁻² NT	2	4	6	8	10
59	304	2°	2	55/55 UV	2	4	6	8	10
60	305	2°	2	105/105 DW	2	4	6	8	10
61	306	2°	2,5	600 g.m ⁻² NT	2,5	5	7,5	10	12,5
62	307	2°	2,5	500 g.m ⁻² NT	2,5	5	7,5	10	12,5
63	308	2°	2,5	400 g.m ⁻² NT	2,5	5	7,5	10	12,5
64	309	2°	2,5	300 g.m ⁻² NT	2,5	5	7,5	10	12,5
65	310	2°	2,5	55/55 UV	2,5	5	7,5	10	12,5
66	311	2°	2,5	105/105 DW	2,5	5	7,5	10	12,5
67	312	2°	3	400 g.m ⁻² NT	3	6	9	12	15

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Conforme Tabela 5.1, no Apêndice III tem-se os resultados de cada ensaio realizado, que foram organizados em gráficos e Tabelas, o que permitiu avaliar o desempenho qualitativo e quantitativo dos LD submetidos a cargas hidráulicas

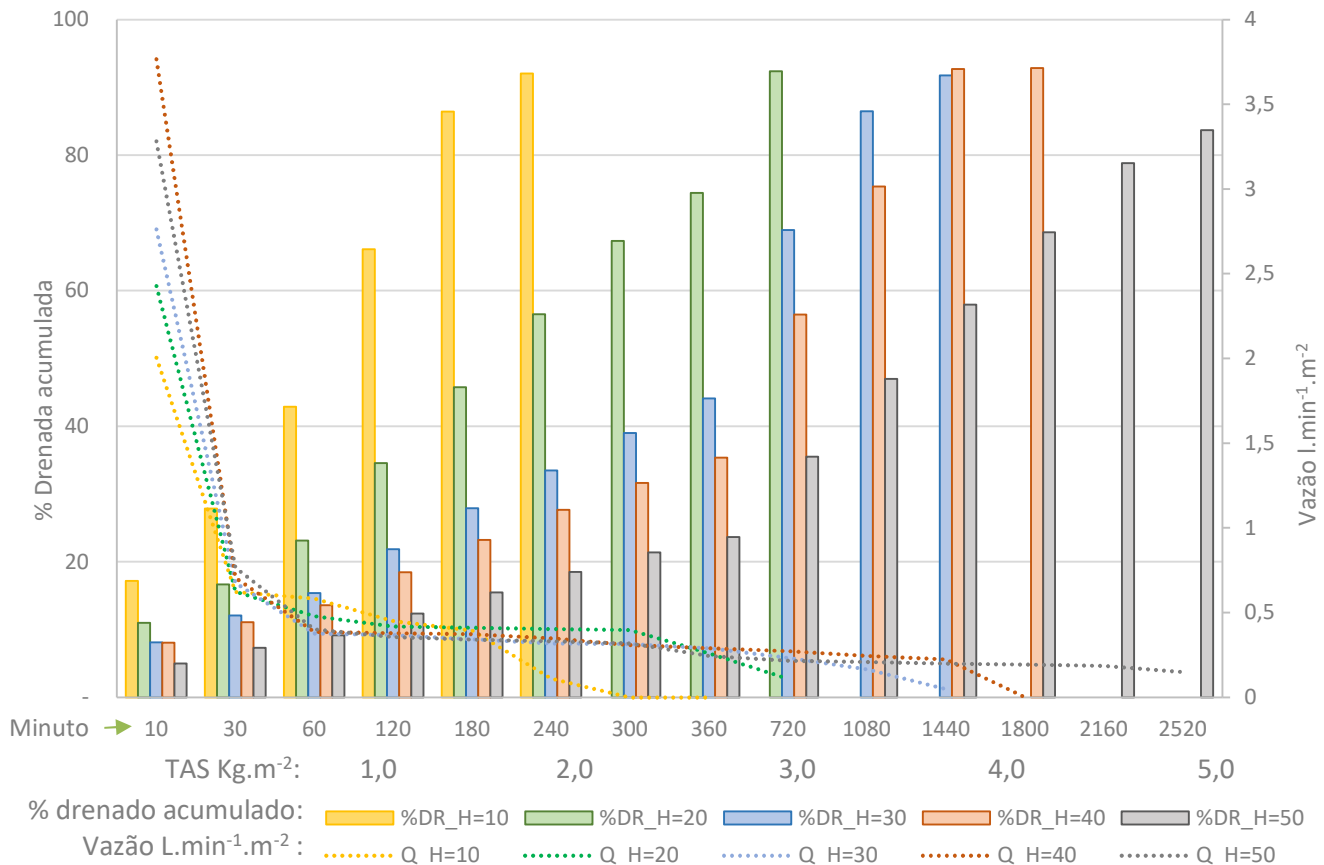
distintas, diferentes geotêxteis e teores de sólidos (%ST). Cada ensaio realizado foi organizado em uma folha no Apêndice III, sendo que o primeiro gráfico de cada página apresenta a variação dos parâmetros de qualidade e taxa de vazão do drenado confrontados com a **porcentagem do lodo**, que foi drenado em relação ao inicialmente aplicado. O segundo gráfico da página apresenta a variação dos mesmos parâmetros de qualidade e taxa de vazão do drenado confrontados com o **volume de lodo** que foi drenado no intervalo de tempo considerado.

A seguir, serão apresentados os resultados de alguns ensaios selecionados para discussão e análise individual, sendo que os resultados dos demais ensaios apresentam-se de forma completa no Apêndice III.

Na Figura 5.2 apresenta-se a taxa de vazão e a porcentagem de água drenada em relação ao volume de lodo aplicado para o Ensaio 7, conforme numeração apresentada na Tabela 5.1. Este Ensaio 7 foi realizado com geotêxtil não tecido de 600g.m^{-2} e lodo com %ST de 1,0% para as 5 alturas de camada de lodo, e conseqüentemente 5 distintas TAS. Na Figura 5.3 tem-se a taxa de vazão do drenado confrontados com o volume de lodo que foi drenado no intervalo de tempo considerado, sendo esse volume está também expresso em taxa, ou seja, volume em litros percolados pela área de aplicação em metros quadrados (L.m^{-2}), também para o Ensaio 7.

Na maioria dos 67 experimentos realizados (335 drenagens), a duração dos ensaios limitou-se a 48 horas, e nesse período pode-se observar a completa extinção da lâmina líquida de água sobre o lodo sedimentado no geotêxtil apenas para os experimentos com menores alturas de camada de lodo e menores teores de sólidos do lodo aplicado, e conseqüentemente menores TAS. Ao todo, 106 leitões com maiores TAS ainda apresentavam fluxo de água livre no momento da interrupção das observações.

Figura 5.2 - Porcentagem de água livre drenada e Taxa de Vazão para o Ensaio 7 com geotêxtil de 600g.m^{-2} e $\%ST=1,0$ para a primeira campanha de coleta de lodo.

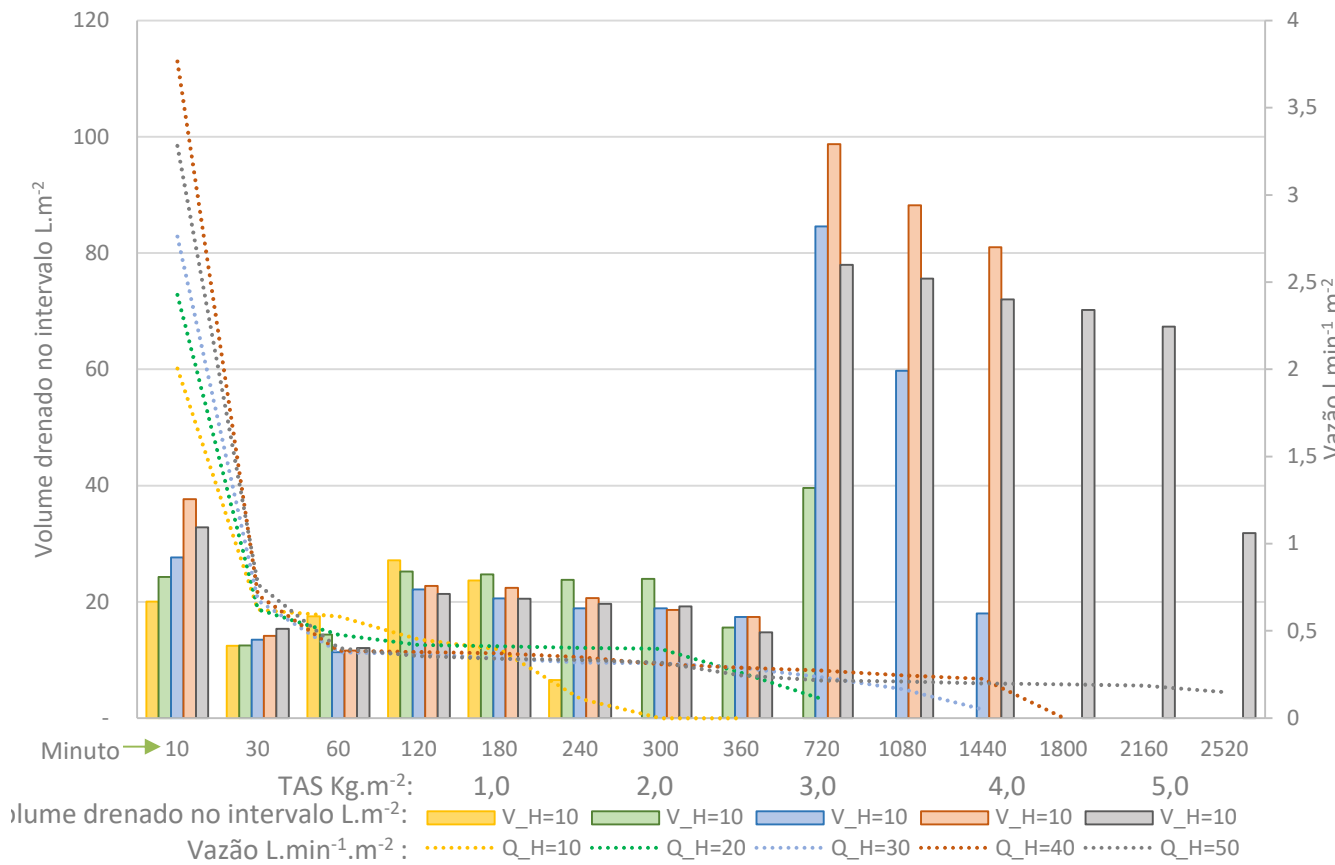


Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Silveira (2012) limitou seus ensaios a utilização de uma TAS máxima de $7,5\text{ kg.m}^{-2}$, em função do tempo de drenagem requerido até a extinção da lâmina líquida, que foi limitado a 2 dias de observação. O mesmo tempo de extinção da água nos LD com TAS semelhantes não pôde ser observado nos experimentos realizados nessa pesquisa, onde TAS iguais ou inferiores a $7,5\text{ kg.m}^{-2}$ ainda apresentavam fluxo de água livre após 48 horas de observação. Uma possível justificativa se deve ao fato de Silveira (2012) ter aplicado a carga de lodo de maneira gradual sobre o LD, sendo que em seus ensaios de escala reduzida, o tempo de aplicação foi de em 53 minutos. A

estabilização da turbidez no momento que cessa a descarga de lodo, também evidencia a influência do carregamento lento.

Figura 5.3 - Volume de água drenada no intervalo ($L.m^{-2}$) para o Ensaio 7 com geotêxtil de $600g.m^{-2}$ e $\%ST=1,0$ para a primeira campanha de coleta de lodo



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3 demonstram, conforme observado em Santos (2012), que há redução da taxa de vazão drenada ao longo do tempo, valores estes que apresentam comportamento inversamente proporcional ao acúmulo do drenado. Barroso (2007) e Mortara (2011) atribuem esse decréscimo a obstrução dos poros do geotêxtil pelas partículas menores de lodo. Silveira (2012) também cita como o fenômeno da colmatação afeta diretamente a capacidade drenante do meio poroso, fazendo o fluxo diminuir à medida que os vazios diminuem.

Para o ensaio com geotêxtil 600g.m^{-2} NT e lodo com %ST de 1,0, conforme ilustrado na Figura 5.2, a redução de volume total do lodo aplicado foi de 95% para o leito com $H=10\text{cm}$ e 92% para os demais leitos, valores estes muito próximos dos encontrados por Silveira (2012), que em seus experimentos com lodos com %ST de 1,5% e 1,6% com $\text{TAS}=7,5\text{kg.m}^{-2}$, alcançou valores de redução de 94% para ambos.

De maneira geral, na variação da taxa de vazão observada no gráfico do ensaio apresentado e nos outros apresentados no Apêndice III, é possível observar que para os primeiros minutos de ensaio a taxa de vazão foi proporcional à altura do lodo aplicado, onde leitos com maiores camadas de lodo apresentam maiores taxas. Após um determinado instante do processo de drenagem, essa tendência se reverte, 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.

Tal comportamento evidencia a influência da sedimentação e da compressão das partículas de lodo no fenômeno do desaguamento em LD, onde 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 maior resistência. 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 contribuí também para decréscimo da taxa de desaguamento.

Na Figura 5.3, ainda para o Ensaio 7, pode-se observar a evolução dos valores para os parâmetros de turbidez e cor verdadeira nas amostras coletadas durante as drenagens do ensaio nos tempos de 1min, 10 min, 30min, 60min, 120min e 180min para leitos com diferentes alturas de camada de lodo.

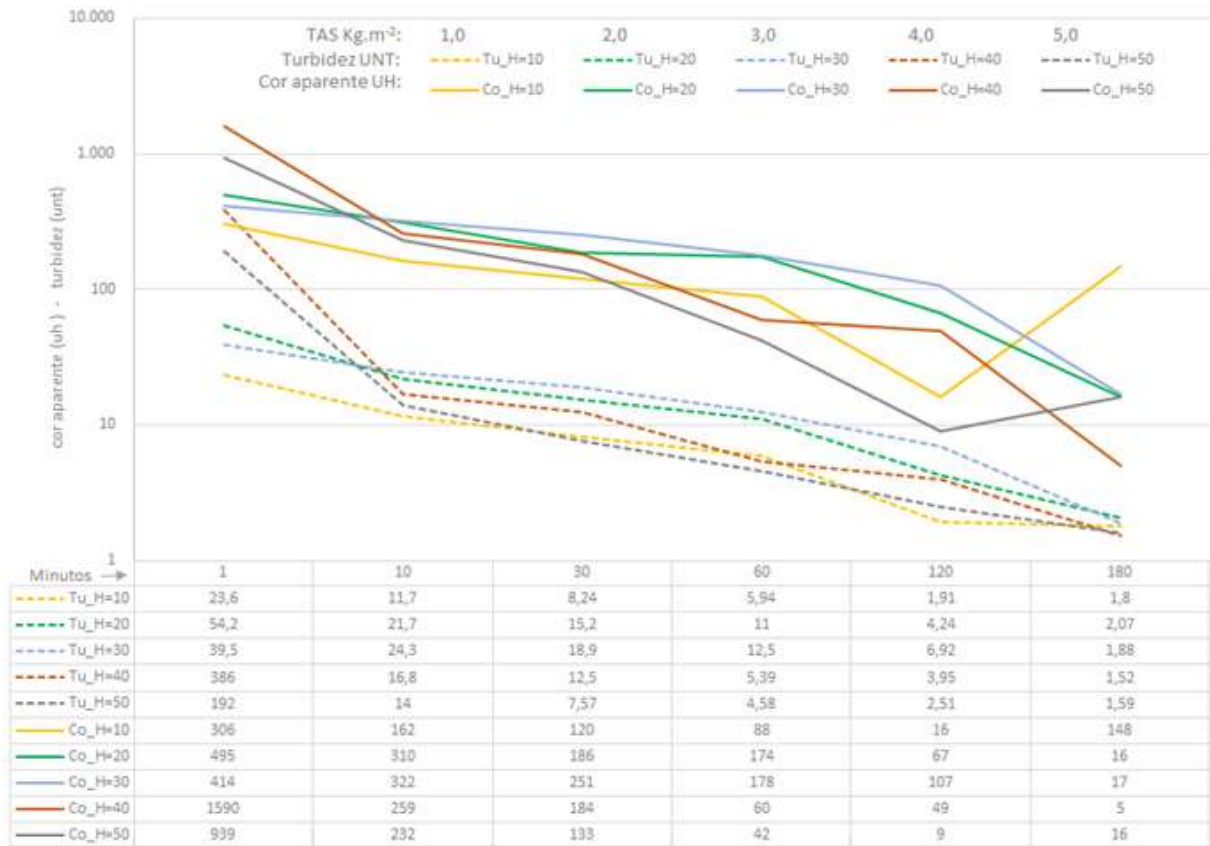
Analisando a Figura 5.4 e conforme observado em Santos (2012), Silveira (2012) e Reis (2011), existe uma tendência de decréscimo nos valores dos parâmetros cor aparente e turbidez do drenado ao longo do processo de desaguamento por LD.

Pode-se observar que as amostras coletadas no tempo de 1 minuto, geralmente, apresentam valores muito elevados de cor e turbidez, sendo que para este ensaio, o leito com carga de lodo $H=40\text{cm}$ apresentou os maiores valores para esses parâmetros, seguido do LD com $H=50\text{cm}$.

Outro fator que pôde ser observado foi o aumento da Cor aparente no tempo de 180 minutos apenas para o LD com $H=10\text{cm}$. Esse fenômeno foi observado em alguns outros ensaios onde o final da drenagem devido à extinção da água livre sobre o leito, coincidiu com a retirada da amostra para a medição dos parâmetros de cor verdadeira e turbidez, geralmente se observou também o aumento nos valores de turbidez. Esse fenômeno pode ser explicado devido ao provável aparecimento de caminhos preferenciais de fluxo no final da drenagem, ocasionado por uma possível modificação da estrutura da torta, que pela diminuição da água livre sofre um alívio de pressão, alterando a estrutura formada pelos sólidos e a água intersticial.

Ao observar a Figura 5.4 e o enquadramento dos drenados nas Classes I, II e III descritas por Silveira (2012), pode-se verificar que a partir de 10 minutos, o drenado de todos os LD já podem ser enquadrados na condição I, com turbidez menor de 40 uT. Já a partir dos 30 minutos, todo o drenado dos LD de $H=10\text{cm}$, $H=40\text{cm}$ e $H=50\text{cm}$ pode ser enquadrado na categoria III. Para o parâmetro cor aparente, foi possível observar que apenas a partir dos 60 minutos o drenado dos leito com $H=50\text{cm}$ obteve cor aparente inferior a 75uH , e os demais em tempos superiores, sendo que o leito com $H=10\text{cm}$ apresentou perda da qualidade nesse parâmetro no tempo de 180min, conforme discutido anteriormente.

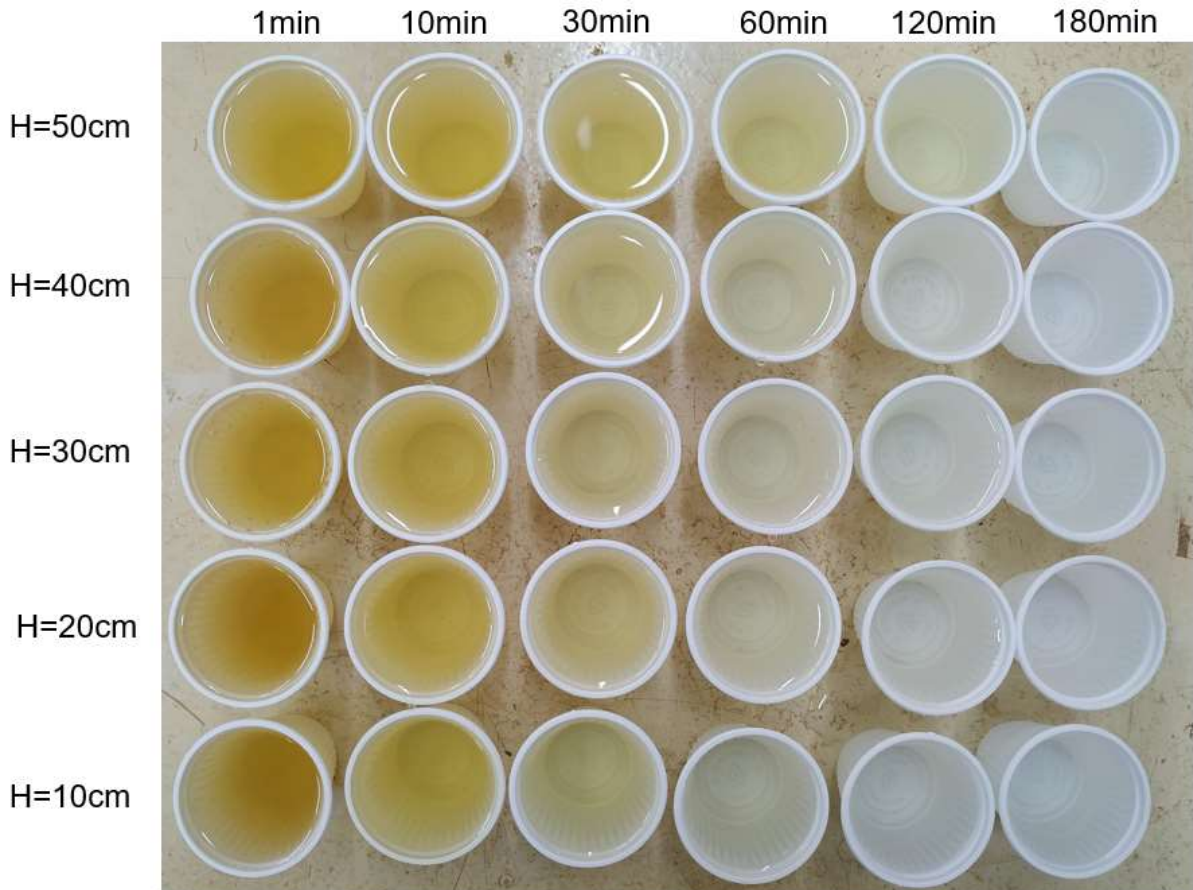
Figura 5.4 - Valores de turbidez e cor aparente para o Ensaio 7 com geotêxtil de 600g.m-2 e %ST=1,0, para a primeira campanha de coleta de lodo



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Na Figura 5.5 pode-se observar visualmente a evolução da qualidade do drenado ao longo do tempo, o ensaio em questão está identificado com o número 34 no Apêndice III, e foi realizado com %ST de 3,0 utilizando o geotêxtil NT de 300.m⁻² com lodo da 1^o campanha de coleta.

Figura 5.5 - Comparação visual dos parâmetros de qualidade do drenado para o Ensaio 34 com %ST do lodo de 3,0 utilizando geotêxtil NT de 300.m-2 para a primeira campanha de coleta de lodo



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

De maneira geral, nos demais ensaios, apresentados no Apêndice III, também pode-se observar decréscimo nos valores de cor aparente, turbidez e taxa de vazão ao longo do tempo, à medida em que se estabiliza a 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.

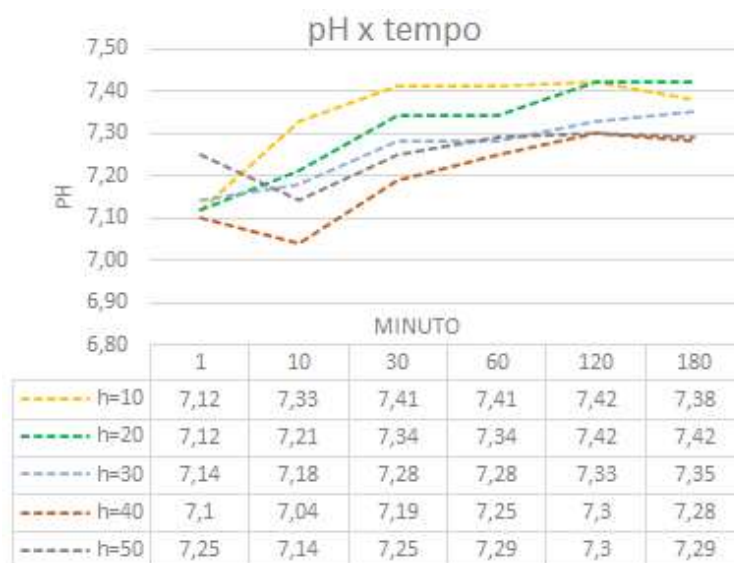
Barroso (2007) indica que na auto filtração, a ação de filtro não se restringi apenas ao geotêxtil, mas propaga-se para a camada adjacente, formando uma espécie de pré-filtro, em que as partículas retidas adjacentes às aberturas do geotêxtil tendem a redistribuir as tensões verticais devido à força de percolação e

força da gravidade, e podem formar arcos que dificultam a passagem de partículas com diâmetros menores que as aberturas dos geotêxteis.

De modo geral, observou-se valores elevados de turbidez e cor aparente no primeiro minuto dos ensaios, sendo que para os ensaios com %ST menores, os altos valores foram observados para o LD como maiores camadas de lodo, tendência que se alterou nos ensaios com %ST maiores, onde os maiores valores foram observados 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 Figura 5.6 pode-se observar a variação de pH do drenado para o mesmo Ensaio 34, onde verifica-se pequenas variações na medição deste parâmetro, com valores máximo de 7,42 pra o tempo de 120min nos LDs com H=10 e H=20 e valor mínimo de 7,10 para o tempo de 1min no LD com H=40. Barroso (2007) observou para o lodo de sulfato de alumínio a mesma tendência de elevação nos valores deste parâmetro.

Figura 5.6 - STYLEREF 1 \s 5. SEQ Figura * ARABIC \s 1 6 - Variação de pH durante a drenagem para o Ensaio 34 com geotêxtil de 300g.m-2 e %ST=3,0. E



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

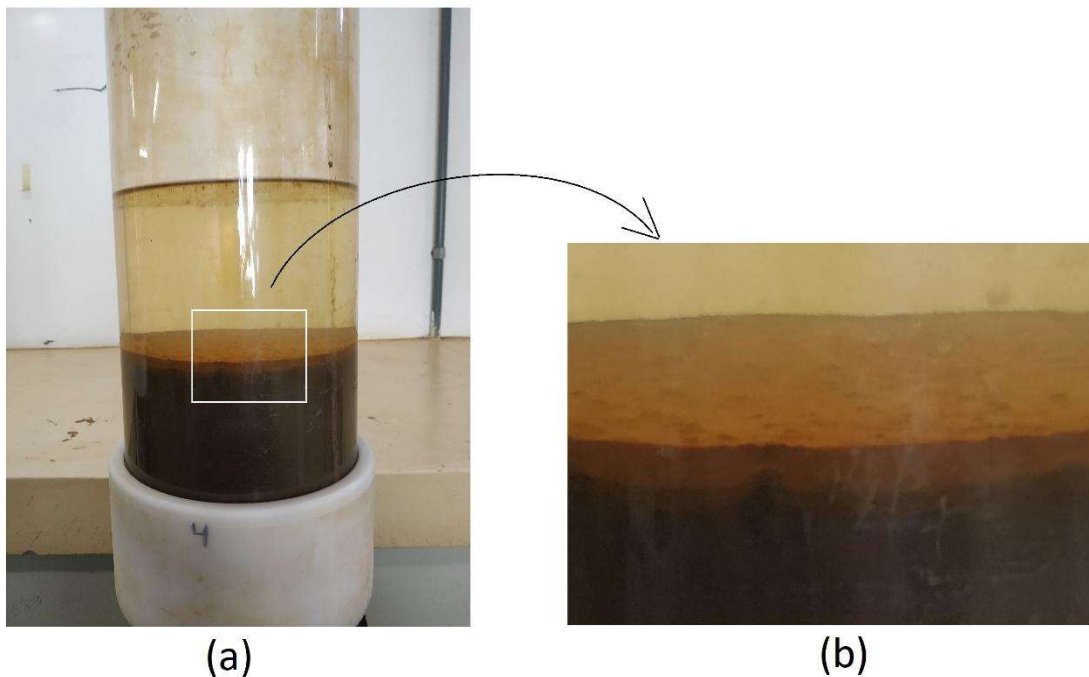
Conforme observado por Barroso (2007), e sobretudo na maioria dos ensaios com %ST iguais ou superiores a 1,5% realizados nesta pesquisa, existe uma tendência de elevação nos valores de pH, onde 25 ensaios dos 67 analisados apresentaram uma tendência de aumento de pH no líquido drenado. Uma possível justificativa deve-se ao fato de o lodo coletado antes da diluição possuir pH de 6,52 para a primeira campanha de coleta e de 6,75 para a segunda, e durante o processo de drenagem, onde observa-se a grande diminuição dos parâmetros de cor e turbidez, que evidenciam a separação da parte líquida da parte sólida do lodo, sólidos estes que dissolvidos ou em suspensão, podem diminuir o pH do lodo e ficaram retidos no leito de drenagem.

Alguns ensaios apresentaram tendência de aumento de pH do líquido drenado até os tempos de 30 e 60 min, e logo após obtiveram diminuição nos valores desse parâmetro para as medições em 120 e 180 min. Essa tendência foi observada em alguns ensaios, e está evidente no ensaio com o geotêxtil tecido 55/55UV e %ST=1,0% da primeira campanha de coleta. Constata-se também nesse ensaio o aumento nos valores de cor e turbidez na medição de 120 e 180min. Tal tendência também foi observada por Barroso (2007) em um de seus ensaios, onde a diminuição de pH seguiu a elevação nos parâmetros medidos para cor.

No Ensaio 24, do Apêndice III, realizado com geotêxtil tecido 105/105 DW com 2,0% de ST da primeira campanha de coleta de lodo, foi observado um pico de taxa de vazão e, conseqüentemente, de volume drenado para o leito de drenagem com camada inicial de lodo de 30cm no tempo de 76 min, observou-se que a aparência do drenado teve características semelhantes à do drenado no início do experimento. Tal episódio evidenciou o aparecimento súbito de um caminho preferencial no filtro formado pelo geotêxtil e os sólidos de lodo sedimentados no leito, uma vez que em poucos minutos foi possível verificar melhora na qualidade do drenado, porém, suas medições de turbidez para os tempos de 120min e 180min foram maiores que a dos demais LD para esse ensaio. Fenômeno semelhante foi observado em mais 5 ensaios com lodo da primeira campanha de coleta que utilizaram o mesmo geotêxtil.

No Ensaio 20, do Apêndice III, com %ST de 2,0% e geotêxtil não tecido de 500g.m^{-2} , com lodo da 1ª campanha de coleta, foi possível observar o comportamento do desaguamento no período de 6 dias. Verificou-se a diminuição progressiva nos valores de taxa de vazão medidos, sendo que nesse intervalo, o LD com altura de 50cm ainda não havia extinguido a lâmina d'água sobre o leito. Na figura 5.7 constata-se que visualmente é possível distinguir as diferenças nas camadas do lodo retido no LD, em que existe uma fase líquida e duas camadas da fase sólida. Sendo a camada superior da fase sólida composta pelas partículas menores do lodo, com menores velocidades de sedimentação.

Figura 5.7 - (a) Foto do LD com $H=50\text{cm}$, %ST=2,0 após 6 dias de drenagem. (b) Detalhe da interfase entre os sólidos sedimentados no LD e a água decantada



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

5.1.1 Análise combinada dos resultados das drenagens ao longo dos ensaios

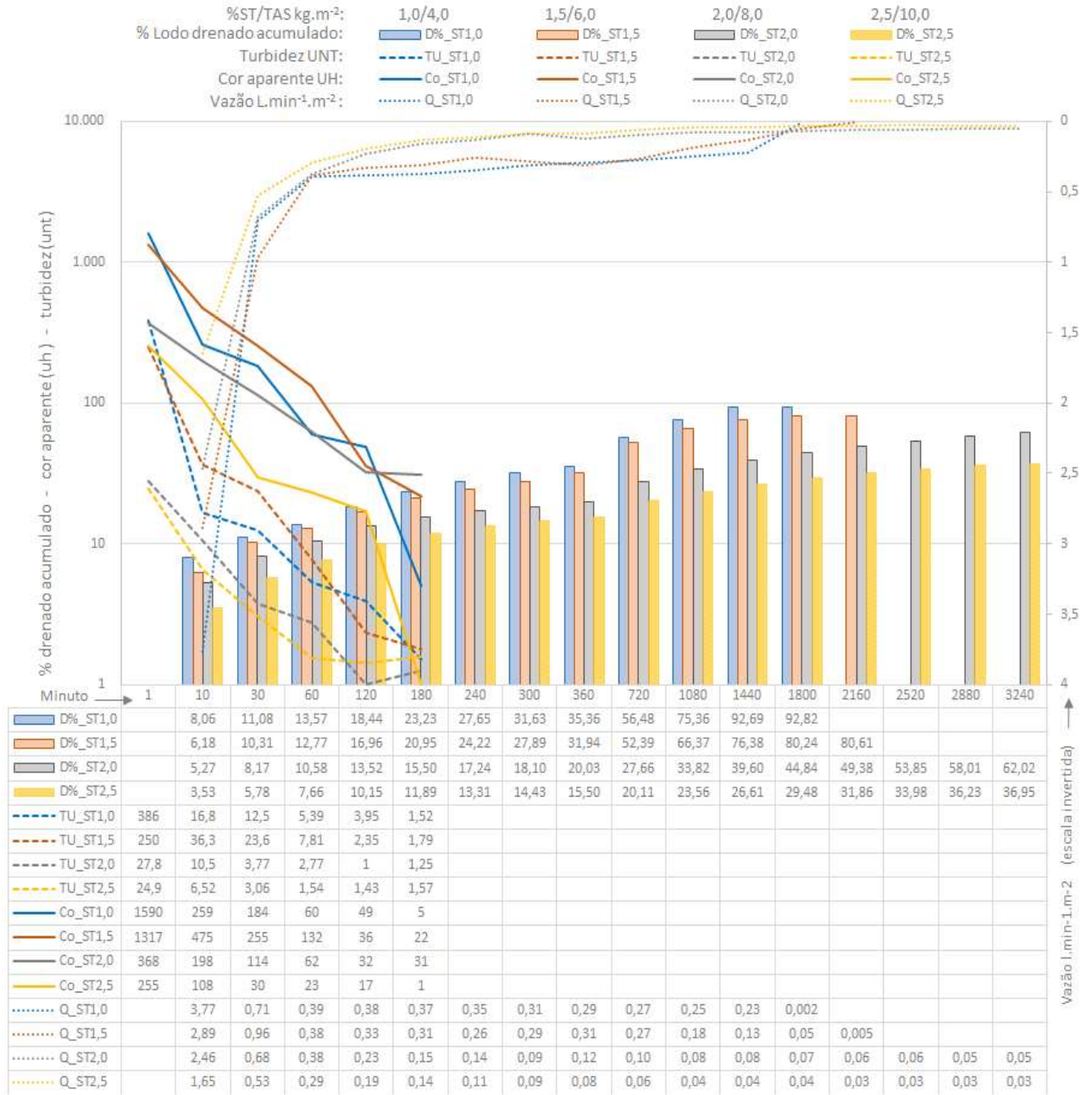
Neste item será apresentada a análise combinada dos resultados das drenagens, com intuito de avaliar a influência da variação de um parâmetro específico

ao longo do processo de drenagem. Para isso, foram compilados alguns resultados de drenagens submetidas às mesmas condições.

5.1.1.1 Influência do teor de sólidos

Com a finalidade de verificar a influência do teor de sólidos inicial do lodo no desaguamento por LD, compilou-se os resultados referentes à qualidade e quantidade do drenado para diferentes %ST em ensaios realizados com o geotêxtil não tecido de 600g.m^{-2} e com altura da camada de lodo inicial de $H=40\text{cm}$, utilizando lodo da 1ª campanha de coleta, conforme Figura 5.8. Pode-se observar que a taxa de vazão e porcentagem de lodo drenado acumulado são inversamente proporcionais à %ST, sendo que apenas os LD com %ST=1,0 e 1,5 tiveram a lâmina d'água extinta no intervalo considerado de 3240 minutos (54 horas).

Figura 5.8 - Parâmetros de qualidade, Taxa de Vazão e porcentagem de água livre drenada para os ensaios com geotêxtil de 600g.m⁻² , H=40 com diferentes %ST



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Ao observar os valores medidos para os parâmetros de qualidade do drenado, foi possível notar menores valores de cor e turbidez para maiores %ST, o que pode ser uma evidência da influência da espessura da camada de sólidos sedimentado nos

LD atuando na auto filtração, onde leitos com maiores %ST e, por conseguinte, maiores TAS tiveram menores taxas de vazão e melhores resultados nos parâmetros de qualidade do drenado.

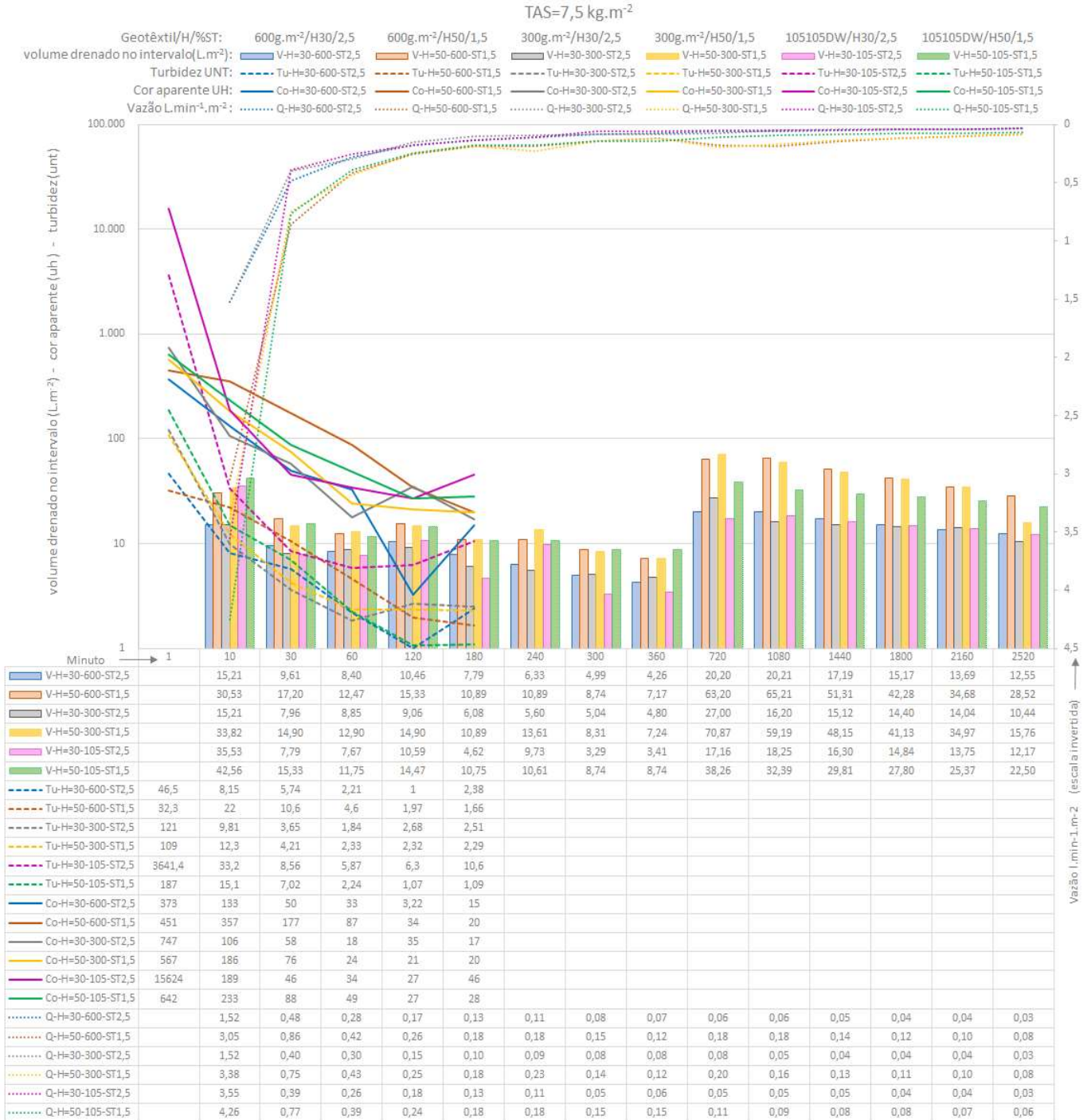
5.1.1.2 Influência da altura da camada de lodo

Com a finalidade de verificar a influência da altura da camada de lodo, compilou-se os resultados de qualidade e quantidade do líquido drenado para diferentes %ST e uma mesma TAS. Conforme evidenciado nos resultados dos ensaios anteriormente apresentados, existe uma grande influência da espessura da camada de sólidos sedimentados do lodo sobre o leito no processo de drenagem, pois essa espessura da camada é proporcional à TAS no leito. Desse modo, mantendo-se uma TAS constante foi possível avaliar apenas a influência da carga hidráulica.

Na Figura 5.9 apresenta-se a variação dos parâmetros de drenagem para 3 tipos de geotêxteis, não tecido de 600g.m^{-2} , não tecido de 300g.m^{-2} e tecido 105/105 DW, com alturas de camada de lodo de 30cm para %ST=2,5 e altura da camada de lodo de 30cm para %ST=1,5, todos os LD com a mesma TAS de $7,5\text{kg.m}^{-2}$, utilizando lodo da 1ª campanha de coleta.

Observado os resultados apresentados na Figura 5.9, nota-se a influência da carga hidráulica sobre os valores do volume de lodo drenado nos intervalos considerados e sobre a taxa de vazão, sendo que os LD com cargas hidráulicas de 50cm tiveram volumes drenados e taxas de vazão maiores que os LD com carga hidráulica de 30cm. A qualidade do drenado não teve grandes variações para os geotêxteis não tecidos de 600 e 300g.m^{-2} com alturas de camada de lodo distintas, o que pode ser um indício da influência do pré-filtro têm 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. Para o geotêxtil tecido 105/105DW, observou-se valores altos nos parâmetros de cor e turbidez nos primeiros minutos, bem acima do apresentado para os outros geotêxtis.

Figura 5.9 - Parâmetros de qualidade, Taxa de Vazão e volume de água drenada no intervalo (L.m⁻²) para os ensaios com TAS=7,5kg.m⁻², diferentes alturas de camada de lodo e geotêxteis



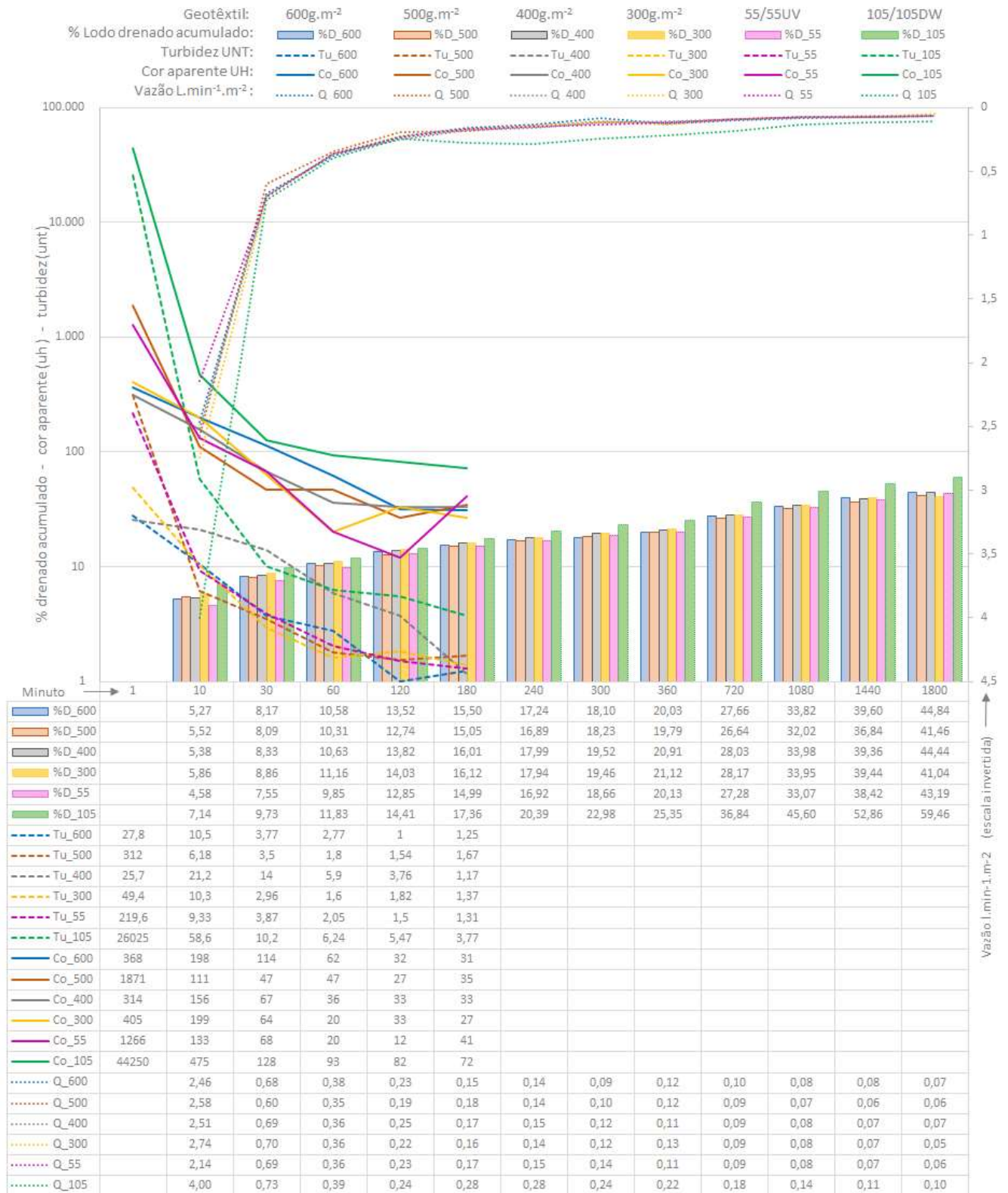
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

5.1.1.3 Influência do geotêxtil no desaguamento

Com a finalidade de avaliar e comparar os parâmetros de qualidade e quantidade de drenado para as diferentes geotêxteis, compilou-se na Figura 5.10 os resultados dos ensaios com altura da camada de lodo de 40cm, TAS=8,0 kg.m⁻² e %ST=2,0 para os seis tipos de geotêxteis utilizados nesta pesquisa, em leitos com aplicação de lodo da 1° campanha de coleta.

Na Figura 5.9 pode-se observar o comportamento semelhante entre os diferentes geotêxteis utilizados nesta pesquisa, com relação à porcentagem do drenado no intervalo considerado, exceto para o geotêxtil tecido 105/105 DW, que apresentou valor cerca de 50% superior para esse parâmetro com relação aos demais. O mesmo pôde ser observado com relação à qualidade do drenado, em que o geotêxtil tecido 105/105 DW apresentou valores altos de cor verdadeira e turbidez, principalmente nos primeiros minutos, juntamente com o valor alto da taxa de vazão, em 4,0 L/min.m²

Figura 5.10 - Parâmetros de qualidade, Taxa de Vazão e porcentagem de água livre drenada para os ensaio com diferentes geotêxteis; H=40 com %ST=2,0



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

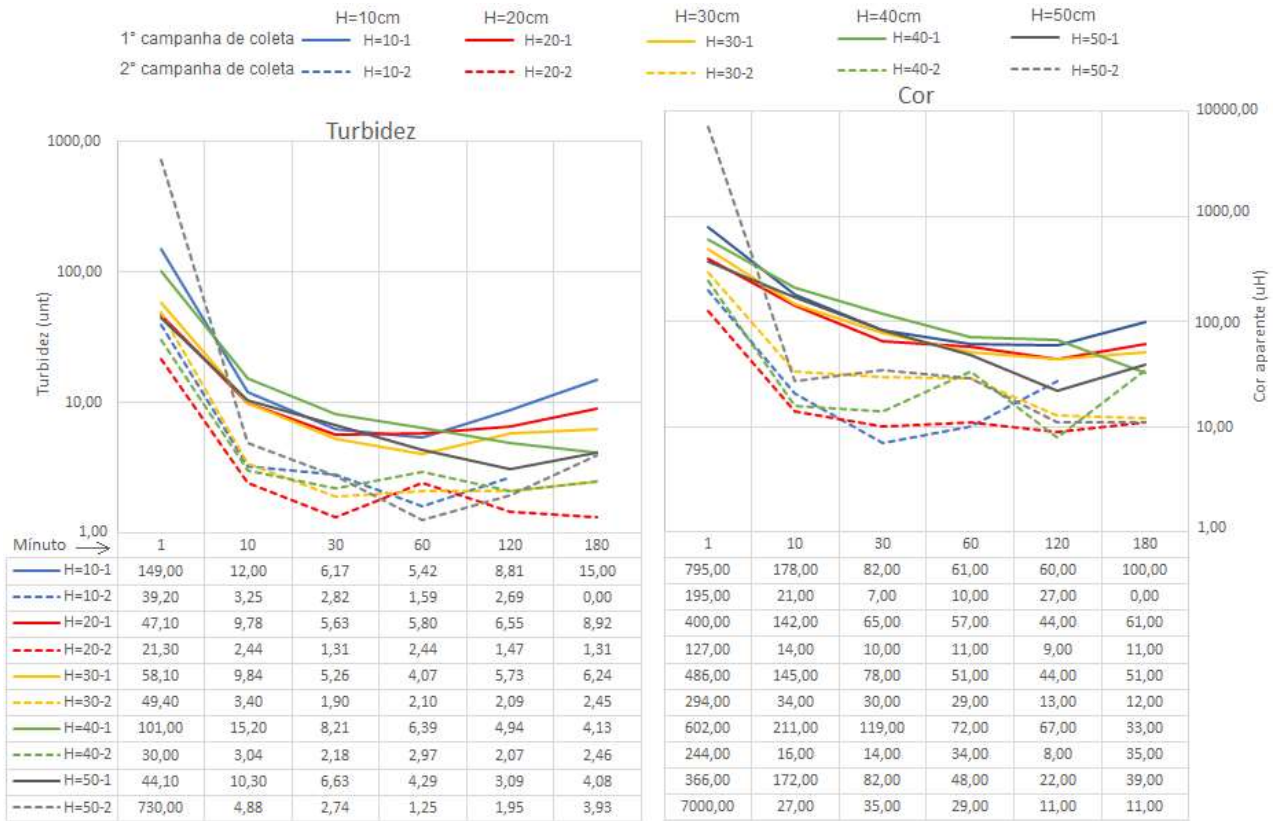
5.1.1.4 Influência dos lodos da primeira e segunda campanha de coleta de amostras nos desaguamentos

A fim de analisar as diferenças entre os ensaios realizados com lodos da primeira e segunda campanha de coleta de amostras, foram comparados os parâmetros de qualidade e quantidade dos drenados de alguns ensaios, submetidos às mesmas condições iniciais, onde apenas variou-se a campanha de coleta de lodo.

Na Figura 5.11 tem-se a comparação da qualidade dos drenados para os ensaios realizados com o geotêxtil NT de 500g.m^{-2} e %ST de 1,5 para lodos da 1° e 2° campanha de coleta. Verificou-se diferenças nos parâmetros de cor aparente e turbidez do líquido drenado para os ensaios, onde lodos da 2° campanha de coleta apresentaram valores menores para estes parâmetros, com exceção da drenagem com altura da camada de lodo de 50cm. O LD com camada de lodo de 50cm e lodo da 2° campanha de coleta apresentou altos valores de cor aparente e turbidez no primeiro minuto de ensaio. No entanto, já no décimo minuto, apresentou valores inferiores quando comparado ao ensaio com lodo da 1° campanha de coleta. Conforme Figura 5.10, após 30 minutos, o líquido drenado apresentou valores baixos de cor e turbidez, inferior a 120uH e a 10uT, respectivamente, independente da campanha de coleta de do lodo.

Analisando os resultados dos ensaios no Apêndice III, de maneira geral, nota-se valores mais elevados para os parâmetros de qualidade em ensaios com lodos da 1° campanha de coleta, sobretudo para o parâmetro de cor aparente.

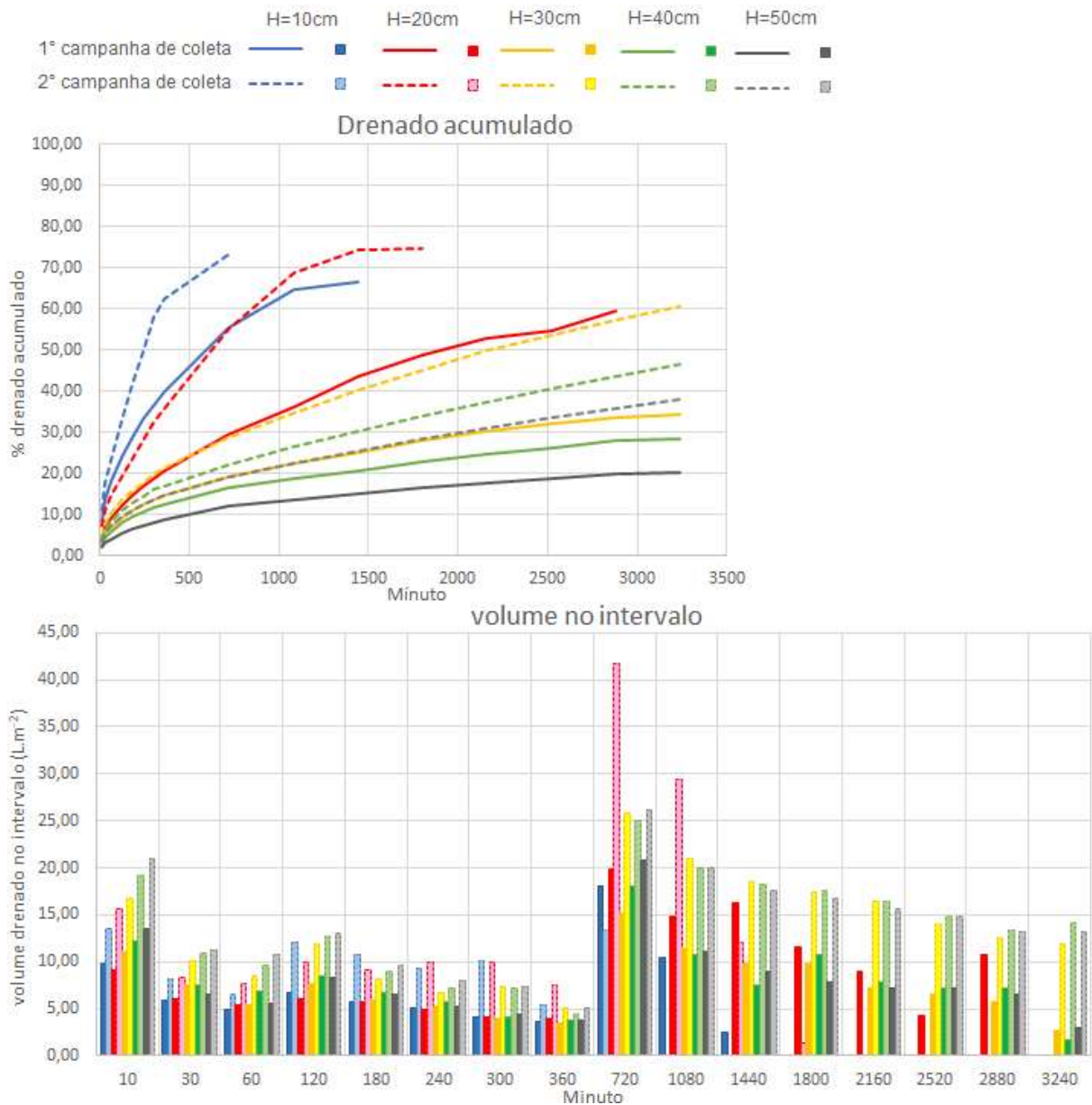
Figura 5.11 - Valores de cor aparente e turbidez para ensaios com geotêxtil NT de 500g.m-2 e %ST=1,5 para lodos da 1° e 2° campanha de coleta



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Na Figura 5.12 tem-se a comparação entre as porcentagens e os volumes drenados nos intervalos para o ensaio com geotêxtil NT de 400g.m⁻² com %ST=3,0 para lodos da 1° e 2° campanha de coleta. Verifica-se que o ensaio com lodo da 2° campanha de coleta apresentaram maiores volumes drenados e, em consequência, maiores porcentagens drenadas nos intervalos considerados. No intervalo de observação, que foi de 3240 min, apenas os leitos com alturas de lodo aplicado de 10cm e 20cm observou-se ausência de fluxo, devido à extinção da água livre sobrenadante no LD. Os resultados demonstraram que maiores taxas de vazão aconteceram para o ensaio com lodo da 2° campanha de coleta. De maneira geral, pôde-se observar esse padrão entre os ensaios realizados quando se compara os resultados para os lodos das duas campanhas de coleta.

Figura 5.12 - Valores Percentagem drenada e volume drenado para ensaios com geotêxtil NT de 400g.m-2 e %ST=3,0 para lodos da 1° e 2° campanha de coleta



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

5.2 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

Com a finalidade de fazer uma análise descritiva dos dados coletados nos ensaios e avaliar a influência das diferentes condições a que foram submetidos os

leitos durante as drenagens, compilou-se em histogramas de frequência os resultados dos 67 ensaios (335 drenagens) apresentados na Tabela 5.1, agrupando-os de acordo com os parâmetros analisados.

Os histogramas foram elaborados considerando a sistematização dos resultados propostas na seção 4.5.2:

- Porcentagem do drenado com Turbidez inferior a 40 uT;
- Porcentagem do drenado com Turbidez inferior a 100 uT;
- Porcentagem do drenado com Turbidez inferior a 10 uT;
- Porcentagem do drenado com Cor aparente inferior a 75 uT;
- Porcentagem drenada em relação ao volume de lodo aplicado;
- Tempo para o término do fluxo de água livre.

Os valores para todos os ensaios das porcentagens dos drenados que se enquadram nas condições de qualidade propostas, e os valores de porcentagem drenada em relação ao volume de lodo aplicado, podem ser consultados nas Tabelas do Apêndice I.

Os histogramas permitiram avaliar a influência das diferentes %ST, alturas de camada de lodo aplicadas e TAS nos desaguamentos por LD, considerando os 6 tipos de geotêxtil utilizados. Ademais, também verificou-se as possíveis diferenças entre os parâmetros de qualidade e quantidade do drenado, considerando os lodos da primeira e segunda campanha de coleta como uma variável.

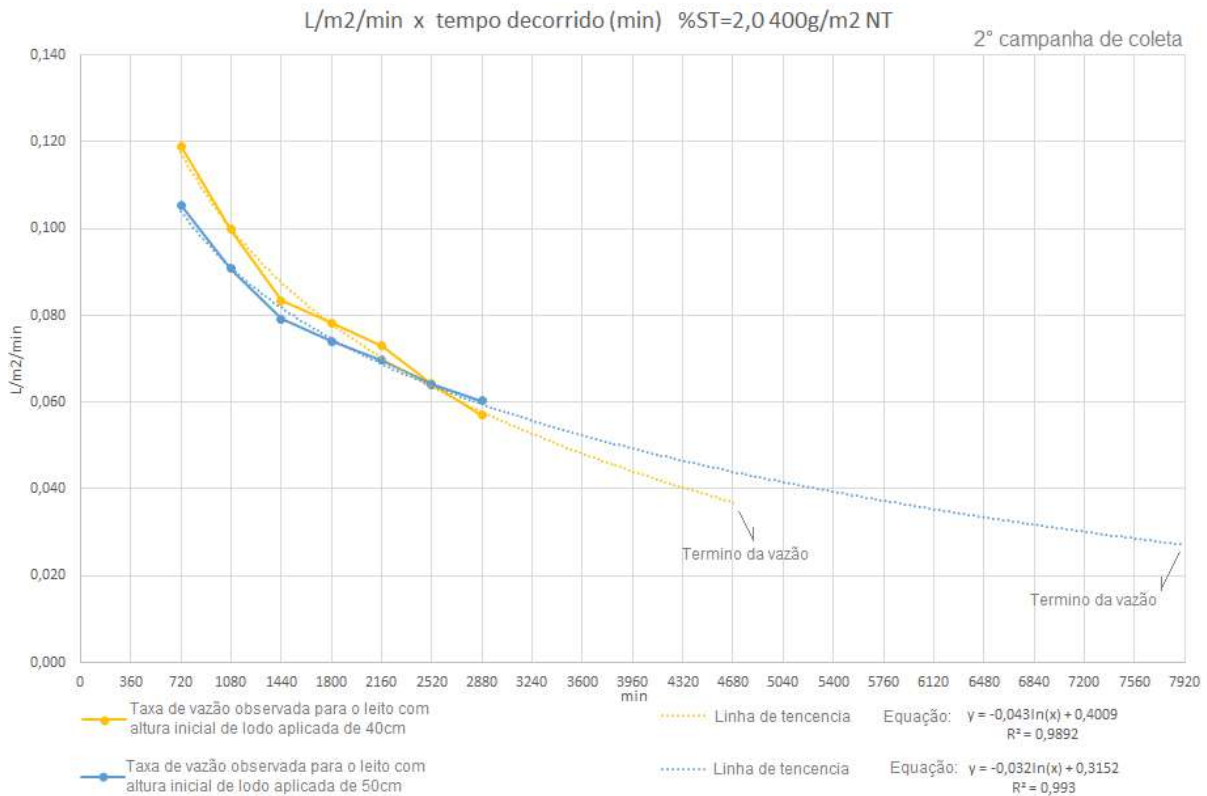
Os histogramas podem ser observados no Apêndice II e embora não tenha sido possível verificar uma distribuição normal nos eventos observados, conforme será discutido na seção 5.2.6, buscou-se fazer uma análise descritiva dos resultados através de curvas de distribuição normal considerando a média e o desvio padrão dos valores observados. A observação das médias permitiu, portanto, a avaliação quantitativa da influência dos parâmetros analisados e o valor dos desvios indicaram a aleatoriedade no conjunto de amostras observadas. Nessa análise foram

desconsideradas as amostras que apresentaram valores superiores a quatro desvios padrão em relação à média.

Das 335 drenagens realizadas, 234 terminaram o fluxo de água livre no período de observação, que foi em torno de 48 horas, ou seja, em 2 dias. No restante das 101 drenagens ainda havia fluxo de água livre sobre as balanças, geralmente em leitos com maiores TAS aplicadas.

Com a finalidade de estimar o tempo de término para as 101 drenagens que não haviam sido concluídas, a taxa de vazão após as medições foi estimada, considerando-se a extrapolação dos valores observados nos intervalos finais de cada medição. Na Figura 5.13 pode-se observar um dos ensaios para ilustrar o comportamento da taxa de vazão medida e estimada, para o ensaio 57 realizado com lodos da segunda campanha de coleta, com %ST de 2,0, geotêxtil não tecido de 400g.m^{-2} e leitos com altura inicial de lodo de 40 e 50 cm. Pode-se notar na Figura 5.13 que o leito com altura de 40 cm tende a terminar a drenagem em 4680 min (78 horas) ou após 3 dias, enquanto o de altura 50 cm em 7920 min (132 horas) ou após 5 dias. O término do fluxo foi considerado quando os leitos alcançaram a média do valor de drenado acumulado para os leitos do mesmo ensaio que extinguiram efetivamente o fluxo de água livre. Tal premissa se mostrou coerente, visto que a análise da porcentagem drenada final apresentou forte correlação apenas com o teor de sólidos (%ST), como será discutido posteriormente.

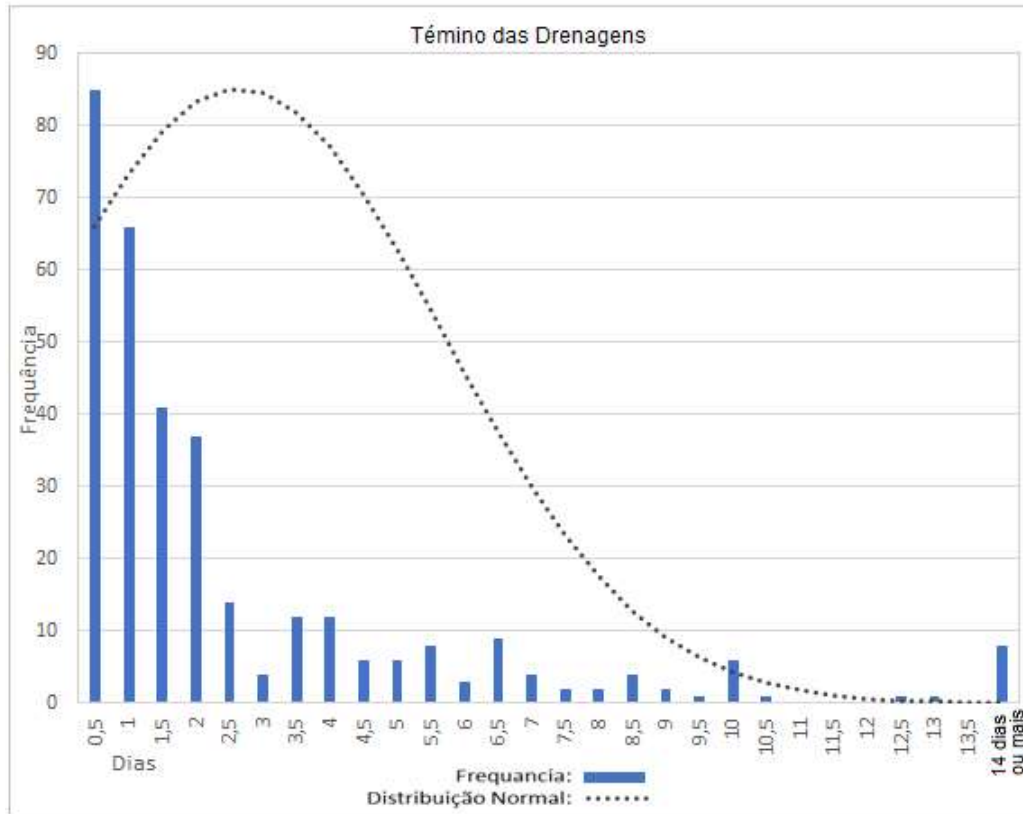
Figura 5.13 - Taxa de vazão observada e estimada para os leitos onde não se observou o término do fluxo no período de observação



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Essa metodologia foi adotada para estimar o fim dos fluxos das 101 drenagens que não extinguiram a camada de água livre sobre o leito. A escala de tempo adotada para a avaliação dos términos das drenagens nos histogramas foi de 12 horas (0,5 dia). O histograma com o tempo de término das 335 drenagens pode ser observado na Figura 5.14.

Figura 5.14 - Término das drenagens em dias, considerando as 355 drenagens realizadas



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Analisando os resultados da Figura 5.14, verificou-se que 151 drenagens, ou seja, 45% das drenagens realizadas terminaram em até um dia o fluxo de água livre.

A porcentagem de água drenada em relação ao volume de lodo aplicado foi avaliada apenas para as drenagens que terminaram seu fluxo no período observado, sendo que das 335 drenagens realizadas, 101 leitos ainda apresentavam fluxo no momento da interrupção do ensaio. Portanto, para essa análise foram considerados 234 drenagens. Os leitos onde foi possível observar o fim do fluxo no período observado podem ser consultados na Tabela 9.3 do Apêndice I, com as porcentagens finais drenadas em relação ao volume do lodo aplicado para cada drenagem.

Embora tenham sido observadas diferenças qualitativas nos drenados de diferentes geotêxteis submetidos a diferentes carregamentos de lodo, com diferentes

concentrações de sólidos, de maneira geral, pôde-se verificar grandes porcentagens dos drenados com qualidade dentro dos valores de Cor aparente e Turbidez propostos, conforme seguir:

- 90,6% dos drenados com Turbidez inferior a 40 uT;
- 92,4% dos drenados com Turbidez inferior a 100 uT;
- 85,0% dos drenados com Turbidez inferior a 10 uT;
- 82,0% dos drenados com Cor aparente inferior a 75 uH.

As porcentagens observadas indicam a eficiência do sistema de LD em realizar o desaguamento de lodo de ETA e promover drenados com valores de turbidez e cor aparente com padrão similar ao estabelecido para corpos de água doce Classe I e II, segundo a Resolução 357/05 do Conama, o que poderia viabilizar o lançamento deste drenado em corpos d'água com limites de turbidez de 100 uT e 75uH para cor aparente.

De maneira geral, verifica-se que a porcentagem drenada sem qualidade compatível com nenhum dos enquadramentos estabelecidos está associada aos drenados nos primeiros minutos das drenagens. O retorno deste drenado ao leito após a formação da camada do pré-filtro, composta pelos sólidos sedimentados sobre o LD, poderia aumentar a porcentagem do drenado com boa qualidade, passível de ser disposto em corpos d'água.

5.2.1 Influência do tipo de geotêxtil nas drenagens

Nos histogramas 01, 02 e 03 do Apêndice II, que comparam a turbidez do drenado para diferentes geotêxteis, observou-se grande similaridade entre os ensaios com diferentes geotêxteis, exceto para o geotêxtil 105/105DW, que apresentou um desempenho inferior comparando aos demais, onde este apresentou a quantidade dos drenados que se enquadra nas condições propostas em torno de 10% inferior

aos demais, além de apresentar maior valor de desvio padrão em relação aos outros geotêxteis, o que evidencia maior aleatoriedade nos resultados usando esse geotêxtil.

Conforme mencionado anteriormente, nos histogramas apresentados no Apêndice II alguns valores foram descartados na análise da influência do tipo de geotêxtil na turbidez, por terem valores com mais de quatro desvios padrão dispersos em relação à média, sendo que estes valores estão associados a menores %ST e alturas de camada de lodo aplicadas.

Analisando o histograma 04 quanto à cor aparente, apresentado no Apêndice II, verifica-se desempenho discretamente inferior dos geotêxteis tecido 105/105DW e não tecido de 600g.m^{-2} em relação aos demais, já que para o geotêxtil tecido, pode-se observar grande variabilidade nos resultados.

Quanto ao término dos fluxos de água livre, no histograma 05 do Apêndice II, pôde-se verificar que não existe influência significativa do tipo de geotêxtil, visto que todos apresentaram valores muito próximos.

A partir do histograma 06 do Apêndice II, referente à porcentagem drenada final em relação ao volume de lodo aplicado no leito para os diferentes geotêxteis, pode-se verificar que não há influência do tipo de geotêxtil na porcentagem drenada.

5.2.2 Influência da altura de camada de lodo aplicada

Nos histogramas 07, 08 e 09 do Apêndice II, referente à porcentagem drenada com os valores de turbidez propostos para diferentes alturas de aplicação de lodo, pode-se verificar tendência de aumento na porcentagem dos drenados com melhor qualidade, com o aumento das alturas de camada de lodo aplicadas, uma vez que os leitos com altura de lodo aplicada de 10 cm apresentam menores valores e maior aleatoriedade nos dados. A maioria dos dados descartados possui valores baixos e estão associados ao geotêxtil tecido 105/105DW, o que corrobora a observação feita na seção 5.2.1 relativa à performance inferior desse geotêxtil na retenção de sólidos suspensos.

Ao observar o histograma 10 do Apêndice II, referente à porcentagem drenado com cor aparente inferior a 75 uH para diferentes alturas de lodo aplicado, verifica-se também uma discreta tendência de aumento na porcentagem de volume dos drenados com melhor qualidade para os leitos com altura de lodo aplicada a partir de 20cm. Já para os leitos com camada de lodo inicial de 10cm, nota-se uma brusca queda na porcentagem, em torno de 20% em relação à média dos demais leitos.

Verifica-se uma grande interferência da altura de camada de lodo no tempo para se extinguir o fluxo de água livre dos leitos no histograma 12 do Apêndice II, que confronta esse parâmetro com o término da drenagem. Pode-se observar um aumento proporcional no tempo de drenagem e na dispersão dos resultados com aumento da altura de camada de lodo inicial. Assim, pode-se constatar um grande número de eventos de término das drenagens nas primeiras 12 horas para os leitos com altura de camada de lodo de 10cm, e uma grande aleatoriedade de valores para os leitos com alturas de camada de lodo de 40 e 50cm.

A menor porcentagem de drenados com melhor qualidade para os leitos de menor altura de lodo aplicada pode ser explicada devido ao menor tempo de drenagem para esses leitos, onde maiores porcentagens do drenado são percoladas nos instantes iniciais da drenagem, antes da estabilização do pré-filtro formado pela sedimentação dos sólidos do lodo.

A partir do histograma 11 do Apêndice II, referentes à porcentagem drenada final, nota-se pouca influência da carga hidráulica sobre o leito na observação deste valor, verifica-se que existe uma relação crescente entre as variáveis, onde leitos com alturas iniciais de 10cm e 20cm apresentaram médias com valores da ordem de 84%, já os leitos de 30cm e 40cm apresentaram médias com valores na ordem de 87%, e o leito com altura inicial de 50cm apresentou média com valor de 91%.

5.2.3 Influência do Teor de sólidos

Com a análise dos histogramas 13, 14 e 15 do Apêndice II, verifica-se pouca influência do teor de sólidos inicial do lodo aplicado na média das porcentagem dos

drenados com melhor qualidade para o parâmetro de turbidez. À vista disso, embora haja uma tendência de aumento na porcentagem dos drenados com melhor qualidade com o aumento do teor de sólidos, não existe uma grande variabilidade nas médias. Ao observar os histogramas, pode-se afirmar que existe maior aleatoriedade nos dados para o para %ST inicial com valor de 0,5.

Para o parâmetro de cor aparente, observando o histograma 16 do Apêndice II, também nota-se baixa influência da variação do teor de sólidos iniciais nos valores médios para este parâmetro.

No histograma 17 do Apêndice II pode-se verificar que o tempo decorrido até o termino das drenagens foi proporcional a variação do teor de sólidos. Apesar da nítida influência do parâmetro nas médias, os maiores valores de desvio padrão observados neste histograma quando comparados com os desvios encontrados no histograma 12, referente às alturas de lodo aplicado e o tempo para o termino das drenagens de água livre, evidenciam maior influência da variação de altura de lodo do que do Teor de sólidos no fenômeno.

Ao observar o histograma 18 no apêndice II, referentes à porcentagem drenada final em relação ao volume de lodo aplicado no leito, conforme a premissa inicial, pode-se verificar que há grande influência da variação deste parâmetro na porcentagem drenada. Nesse sentido, observou-se uma relação inversa entre as variáveis, com leitos com lodos de maior concentração de sólidos inicial apresentando menores porcentagens drenadas finais. É possível constatar uma diferença de 23% quando compara-se os valores extremos de %ST do lodo aplicado.

5.2.4 Influência da Taxa de Aplicação de Sólidos

Conforme exposto na Tabela 5.1, nesse trabalho foram executadas drenagens com 17 taxas de aplicação de sólidos distintas, variando de 0,5 até 15 kg.m⁻². Nos histogramas 19, 20, 21, 22, 23 e 24 do Apêndice II, os resultados foram agrupados

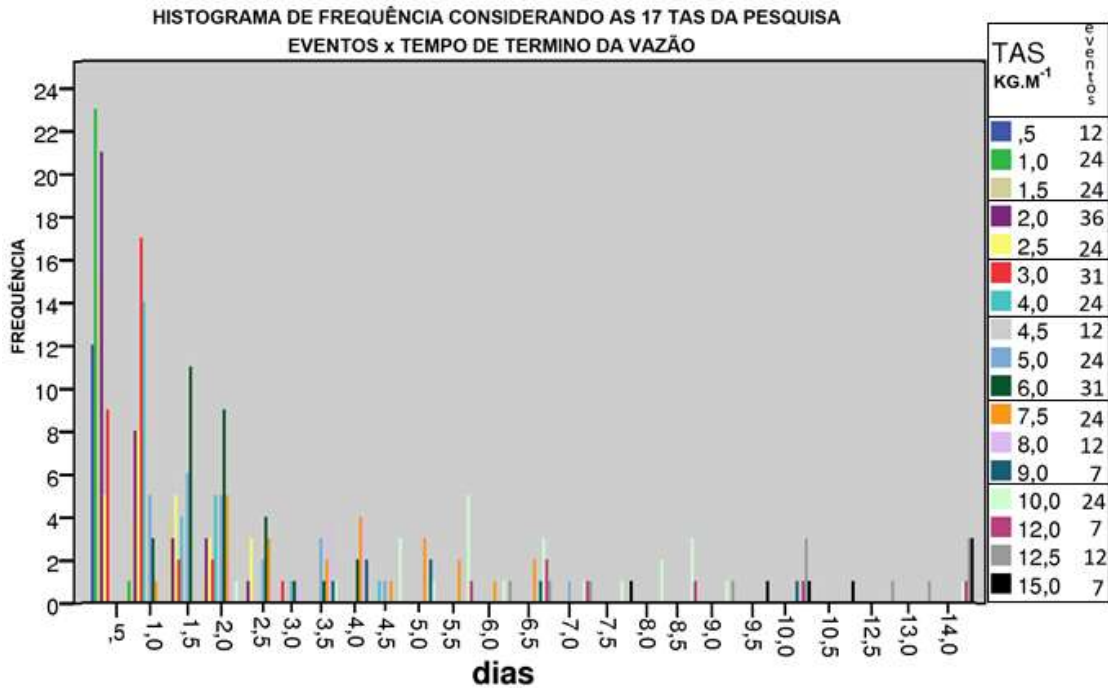
em seis faixas de valores de modo a haver um número similar de eventos em cada faixa analisada.

A TAS é uma variável diretamente relacionada com os parâmetros de %ST e altura do lodo aplicado. Sendo assim, conforme observado nas análises destes parâmetros, dados estes ilustrados nos histogramas 19, 20, 21 e 22, verificou-se um aumento da porcentagem dos drenados com melhor qualidade proporcional ao aumento da TAS, sendo que para o parâmetro de cor, observa-se uma média com valor bem inferior para a faixa de TAS entre 0,5 e 1,5 kg.m⁻² em relação às demais TAS,. Além disso, verifica-se uma maior aleatoriedade nas porcentagens drenadas com boa qualidade nas drenagens realizadas com menores TAS.

Avaliando o tempo de término das drenagens no histograma 23 do Apêndice II, pode-se verificar grande influência da TAS no processo, com tempo superior de drenagens para os leitos com maiores TAS. Observou-se menores desvios padrão nos dados para a TAS quando comparados com a altura de aplicação do lodo e a %ST, indicando maior correlação deste parâmetro com o tempo de desaguoamento em relação aos demais. Além do exposto no histograma 23 do Apêndice II, na Figura 5.15 pode-se verificar a distribuição dos eventos considerando o fim da drenagem para as 17 TAS consideradas, e o agrupamento que foi considerado nos demais histogramas da análise da TAS.

Ao observar o histograma 24 do Apêndice II, referente à porcentagem final drenada e às diferentes faixas de TAS, nota-se uma relação inversamente proporcional entre esses parâmetros, com leitos com menores TAS apresentando maiores porcentagens de drenado. Sendo a TAS um parâmetro diretamente relacionado %ST do lodo, tal comportamento já era esperado.

Figura 5.15 - Fim da drenagem para as 17 TAS consideradas e agrupamento considerado nos histogramas



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

5.2.5 Influência dos lodos da primeira e segunda campanha de coleta Sólidos

Observando os histogramas 25, 26 e 27 do Apêndice II, considerando os lodos da primeira e segunda campanha de coleta como variáveis, verificou-se pouca influência da campanha de coleta quanto às porcentagens drenadas com turbidez abaixo dos valores arbitrados. Embora as médias tenham obtido valores muito próximos, verifica-se que existe uma diferença na distribuição dos eventos, com maiores picos de porcentagem com qualidade elevada para os ensaios com lodo da segunda campanha de coleta.

Em relação às porcentagens do drenado com cor aparente inferior a 75 uH no histograma 28 do Apêndice II, verifica-se que houve uma diferença mais significativa em relação à análise do parâmetro de turbidez, onde os drenados dos lodos da primeira campanha de coleta apresentaram menores porcentagens. Tal observação

pode estar relacionada com a diferença na distribuição do tamanho das partículas dos lodos, com discussões que estão apresentadas no item 5.6.5.

Ao observar o histograma 29 do Apêndice II referente ao término das drenagens para as duas campanhas de coleta de lodo, verifica-se que a diferença de tempo para os terminos das drenagens entre as drenagens com lodos da primeira e segunda campanha de coleta, onde as drenagens com lodos da primeira campanha de coleta terminaram em média um dia mais tarde quando comparadas com as drenagens com lodo da segunda campanha de coleta. Tal observação também pode estar relacionada com a diferença na distribuição do tamanho das partículas dos lodos e será discutida posteriormente.

No que tange ao histograma 30 do Apêndice II referente à porcentagem total drenada em relação ao total de lodo aplicado, considerando os lodos da primeira e segunda campanha de coleta, verificam-se valores médios muito próximos entre os dois lodos, sendo que as drenagens com lodo da primeira campanha de coleta apresentaram valores mais baixos e mais aleatórios.

5.2.6 Teste de normalidade dos dados

A fim de testar se os dados seguem a distribuição Normal, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk, conforme exposto na seção 4.5.2.5. Na Tabela 5.2 podem ser verificados os valores da Estática W do teste de Shapiro-Wilk.

Tabela 5.2 - Teste de Normalidade Shapiro-Wilk

Variável	Estatística W	P-Valor
% do drenado com cor aparente inferior a 75 uH	0,64	Aprox. 0
Fim da Drenagem em dias	0,71	Aprox. 0
% do drenado com Turbidez inferior a 40 uT	0,9	Aprox. 0
% drenada final	0,51	Aprox. 0

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Observando a Tabela 5.2, nota-se que para todas as variáveis de saída o p-valor do teste foi de aproximadamente 0. Portanto, a um nível α igual a 0,05, pode-se afirmar que os dados de todas as variáveis de saída não seguem normalidade.

5.2.7 Correlação entre os parâmetros observados (Correlação de Spearman)

Para quantificar a associação entre as variáveis de entrada e as variáveis de saída, foi realizado o teste não-paramétrico de Spearman, visto que os dados não possuem normalidade, conforme observado na seção 5.2.6. Na Tabela 5.3 e 5.4 tem-se os valores da correlações entre as variáveis, que foram calculados conforme exposto na seção 4.5.2.6. O número total de eventos considerados em cada análise está indicado entre parênteses na frente do valor da correlação.

Tabela 5.3 - Análise de correlação considerando a campanha de coleta de lodo como variável qualitativa

	%ST	Altura Camada de lodo (cm)	TAS	Campanha de coleta de lodo
Fim da drenagem (dias)	0.4459 (335)	0.7977 (335)	0.8693 (335)	-0.2279 (335)
% do drenado com turbidez inferior a 40uT	0.1794 (335)	0.4763 (335)	0.4587 (335)	0.1179 (335)
% do drenado com cor aparente inferior a 75uH	0.1238 (335)	0.6114 (335)	0.4954 (335)	0.1717 (335)
% drenada total	-0.9121 (234)	0.2597 (234)	-0.5921 (234)	0.1672 (234)

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Tabela 5.4 - Análise de correlação considerando os geotêxteis como variáveis qualitativas

Geotêxtil	Fim da drenagem em dias	% do drenado com turbidez inferior a 40uT	% do drenado com cor aparente inferior a 75uH	Porcentagem drenado
600g.m ⁻²	0.0035 (335)	0.1775 (335)	-0.0186 (335)	-0.0368 (234)
500g.m ⁻²	-0.0422 (335)	-0.0086 (335)	0.0304 (335)	0.0267 (234)
400g.m ⁻²	0.0187 (335)	0.1897 (335)	0.0306 (335)	-0.0127 (234)
300g.m ⁻²	-0.0146 (335)	0.0733 (335)	0.1054 (335)	0.0521 (234)
55/55UV	0.0421 (335)	0.0705 (335)	0.1796 (335)	-0.0187 (234)
105/105DW	-0.0081 (335)	-0.5092 (335)	-0.3286 (335)	-0.0113 (234)

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

O sinal da correlação de Spearman indica a direção da associação entre a variável independente e a variável dependente. Se o valor da variável dependente tende a aumentar quando a variável independente aumenta, o coeficiente de correlação de Spearman é positivo, e quanto maior a correlação entre as variáveis, mais próximo de 1 é o valor atribuído. Se a variável dependente tende a diminuir quando a variável independente aumenta, o coeficiente de correlação de Spearman é negativo, e quanto maior essa correlação inversa, mais próximo de -1 é o valor atribuído. Um coeficiente de Spearman igual a zero indica que não há tendência de que a variável dependente aumente ou diminua, quando a variável independente aumenta.

De maneira geral, as análises de correlações reforçam observações da análise descritiva dos histogramas (seções 5.2.1 a 5.2.5), ou seja, o tipo de geotêxtil possui correlação fraca com as variáveis de saída, com exceção do geotêxtil tecido 105/105DW no que se refere à turbidez, o que corrobora com as observações do item 5.2.1. Também há evidências de uma forte relação inversa entre a %ST do lodo aplicado e a porcentagem drenada final, sendo que esse foi o valor mais alto de correlação observado. Conforme pontuado na seção 5.2.4 e na Tabela 5.3, a TAS é o parâmetro com maior correlação (0,8693) com o término das drenagens, influenciado mais pela altura da camada de lodo (0,7977) do que pelo teor de sólidos %ST

(0,4459). Na tabela 5.3 verifica-se que a altura de camada de lodo foi o parâmetro com mais influência quando se avalia a porcentagem dos drenados com melhor qualidade, onde leitos com menores alturas de lodo aplicados apresentaram porcentagens menores com qualidade compatível com os valores estabelecidos nessa pesquisa. Analisando-se os valores dos parâmetros de qualidade ao longo dos ensaios nos gráficos disponíveis no Apêndice III, de maneira geral, não se observa menores valores de cor aparente e turbidez para os LDs com menores alturas, e pode-se verificar que os LDs submetidos a diferentes alturas de lodo, vão melhorando a qualidade do drenado de maneira uniforme ao longo do tempo dos ensaios. Portanto, o fato de os leitos com menores alturas, e conseqüentemente, menores volumes por unidade de área de geotêxtil, apresentarem as menores porcentagem dos drenados com boa qualidade, está relacionado com o fato de a porcentagem drenada com baixa qualidade, antes da estabilização do pré-filtro formado pelos sólidos dos lodos sedimentados, ser maior em relação ao volume drenado total para os leitos com menores alturas de lodo. Além disso, os leitos que não apresentaram nenhum drenado com boa qualidade estão associados a menores alturas de aplicação de lodo e baixas %ST, e pode-se verificar que estes ensaios terminaram o fluxo antes que os drenados apresentassem melhora na qualidade.

Portanto, a estabilização do pré-filtro é um fator determinante para a melhora da qualidade dos drenados, sendo que essa estabilização não está associada à altura de camada de lodo aplicada. Leitos com menores alturas de lodo, apresentam menores porcentagens drenadas com boa qualidade, pelo simples fato de seus volumes drenados iniciais serem mais representativos em relação ao total drenados para esses leitos.

5.3 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS (REGRESSÃO LINEAR)

O método utilizado foi o de regressão linear múltipla. Esse método relaciona múltiplas variáveis de entrada com uma única variável resposta. Foram elaborados 4 modelos de regressão, a fim de estimar as seguintes variáveis resposta:

- Porcentagem do drenado com Turbidez inferior a 40 uT;
- Porcentagem do drenado com Cor aparente inferior a 75 uT;
- Porcentagem drenada em relação ao volume de lodo aplicado;
- Tempo para o término das drenagens.

Conforme exposto no item 4.5.2.7 os modelos de regressão utilizados nesse projeto são dados pela seguinte equação:

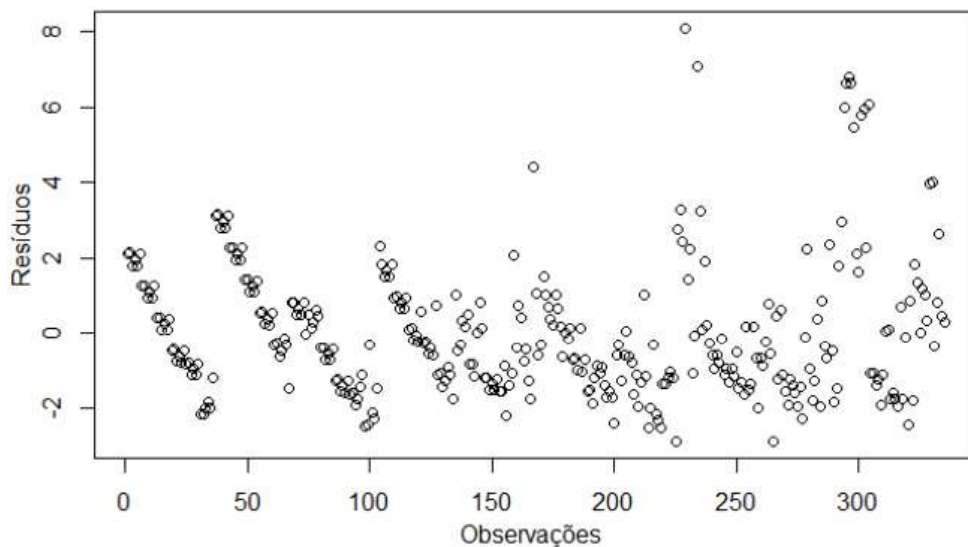
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 C_i + \beta_4 G_i \quad (4.6)$$

- y é cada variável resposta
- β_0 é o intercepto do modelo.
- x_1 é teor de sólidos totais do lodo aplicado.
- x_2 é a altura da camada de lodo inicial.
- C_i é 1, se é o lodo da 2° campanha de coleta; 0, caso contrário.
- G_1 1, se é o Geotêxtil NT de 600g.m⁻²; 0, caso contrário.
- G_2 1, se é o Geotêxtil NT 400g.m⁻²; 0, caso contrário.
- G_3 1, se é o Geotêxtil NT 300g.m⁻²; 0, caso contrário
- G_4 1, se é o Geotêxtil 55/55UV; 0, caso contrário.
- G_5 1, se é o Geotêxtil 105/105DW; 0, caso contrário.
- Já o Geotêxtil NT de 500g.m⁻² e o lodo da 1° campanha de coleta estarão inclusos no intercepto quando G_i for 0 para todos os casos e C_i for 0, pois isso indicará que refere-se a lodos da 1° campanha de coleta, ou seja, para avaliar a significância do geotêxtil NT de 500g.m⁻² e lodos da 1° campanha de coleta, é necessário olhar para a significância do intercepto.

5.3.1 Fim da Drenagem em dias (modelo1)

No primeiro modelo a variável resposta y será o Fim Da Drenagem em Dias, conforme a equação (4.6). O gráfico dos resíduos da regressão encontra-se na Figura 5.16 e representa a diferença do valor estimado pela regressão em relação ao valor observado, ambos em escala logarítmica.

Figura 5.16 - Gráfico dos resíduos para o modelo 1 Fim da Drenagem em Dias



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

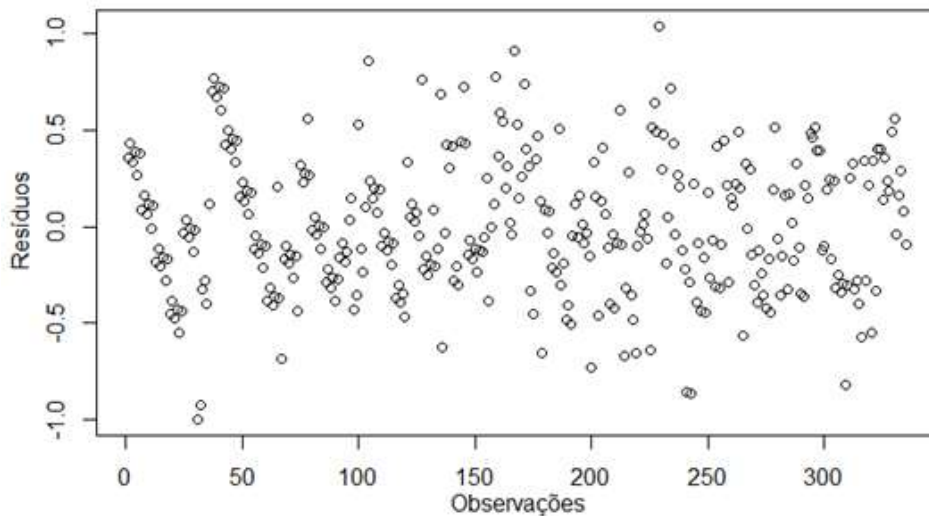
Analisando a Figura 5.15, percebe-se que a variância dos erros não é constante e aparenta ter um padrão no início, o que compromete o modelo, de acordo com as condições de Gauss-Markov. Tendo isso em vista, realizou-se uma transformação para a escala logarítmica, conforme equação 5.1.

$$\ln y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 C_i + \beta_4 G_i \quad (5.1)$$

Realizando novamente o gráfico dos resíduos conforme a equação (5.1), pode-se observar, de acordo com a Figura 5.17, que a variância dos resíduos é constante, obtendo melhores resultados do modelo. É importante ressaltar que os valores

intermediários agora estão em função logarítmica, sendo necessário aplicar função exponencial para encontrar seu valor original.

Figura 5.17 - Gráfico dos resíduos para o modelo 1, Fim da Drenagem em Dias, com escala logarítmica



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

O Coeficiente de determinação do modelo (R^2) apresentou um valor de 0.86, o valor de R^2 é uma medida de ajuste de um modelo estatístico linear generalizado, seu valor varia entre 0 e 1, valores mais próximos de 1 indicam que o modelo linear proposto apresenta uma boa representatividade em relação aos valores observados. Sendo assim, a descrição do ajuste fica como mostra a Tabela 5.5 e pode-se notar que as variáveis %ST, campanha de coleta do Lodo, Altura da camada de lodo e Geotêxtil 55/55UV possuem p-valor próximo de 0, que atesta sua significância na variável resposta. Além disso, o intercepto, que contém as variáveis de referência 1° campanha de coleta e geotêxtil 55/55UV, possui p-valor próximo de 0, ou seja, apresentam significância na variável resposta que é o Fim da drenagem em dias. Já os outros tipos de geotêxteis não apresentam significância a um nível α igual a 0,05, considerando este modelo de análise proposto.

Tabela 5.5 - Tabela com a descrição do ajuste do modelo 1 com escala logarítmica

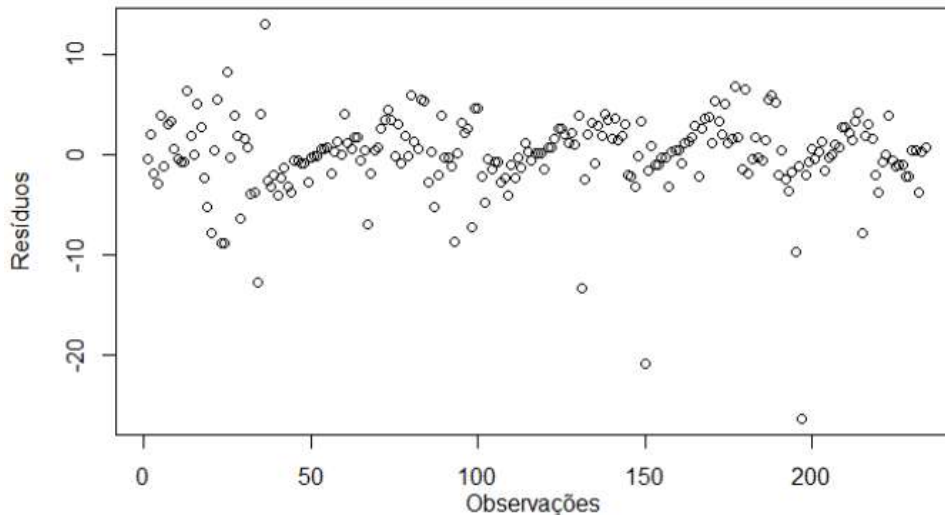
R ² =0,86	(β) Estimativa	Desvio Padrão	Valor t	P-Valor
Intercepto	-1.9246	0.0784	-24.54	< 2e ⁻¹⁶
%ST	0.5436	0.0244	22.32	< 2e ⁻¹⁶
Lodo 2° camp.	-0.3398	0.0396	-8.58	3.85e ⁻¹⁶
H lodo	0.0529	0.0014	38.26	< 2e ⁻¹⁶
600g.m ⁻²	0.0709	0.0683	1.04	0.3000
400g.m ⁻²	0.0941	0.0670	1.41	0.1607
300g.m ⁻²	0.0443	0.0683	0.65	0.5167
55/55UV	0.1657	0.0683	2.43	0.0158
105/105DW	0.0521	0.0683	0.76	0.4465

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

5.3.2 Porcentagem do Drenado em relação ao volume do Lodo aplicado no Leito (modelo 2)

No que se refere ao segundo modelo dado pela equação (4.6), mas com a variável resposta sendo a porcentagem do drenado em relação ao volume do lodo aplicado no leito, vale ressaltar que foram consideradas apenas os resultados dos leitões que haviam terminado suas drenagens de água livre no período observado, considerando-se, assim, 234 observações de drenagens para essa regressão. O gráfico com os resíduos dessa regressão está exposto na Figura 5.18.

Figura 5.18 - Gráfico dos resíduos para o modelo 2, porcentagem do drenado em relação ao volume do Lodo aplicado no leito



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Ao analisar os resíduos do modelo através da Figura 5.18, pode-se perceber que a variância não é constante apresentando um padrão, ou seja, os resíduos são heterocedásticos. Para contornar a heterocedasticidade foram realizadas transformações no modelo, a fim de tornar os resíduos homocedásticos. Após realizar várias tentativas de transformações (logarítmicas, quadráticas, Box-Cox), não foi possível tornar os dados homocedásticos. Com isso, embora não seja válido afirmar que o modelo é um bom ajuste para a porcentagem drenada total em relação ao volume do Lodo aplicado no leito, há evidências fortes, observadas na análise descritiva, da correlação da %ST do lodo com a porcentagem drenada, o que também se verifica no valor de β_1 da regressão, que apresenta o valor de 0.74 para o R^2 , que pode ser considerado um valor razoável de coeficiente de determinação, visto que o modelo linear explica 74% da variância da variável dependente a partir das variáveis independentes consideradas no modelo.

Na Tabela 5.6 tem-se a descrição do ajuste para o modelo proposto.

Tabela 5.6 - Tabela com a descrição do ajuste do modelo 2

R ² =0,74	(β) Estimativa	Desvio Padrão	Valor t	P-Valor
Intercepto	98.9897	1.1154	88.75	< 2e ⁻¹⁶
%ST	-8.8611	0.3662	-24.20	< 2e ⁻¹⁶
Lodo 2° Camp.	3.1730	0.5335	5.95	1.03e ⁻⁰⁸
H lodo	-0.0519	0.0226	-2.30	0.0226
600g.m ⁻²	-0.5826	0.8982	-0.65	0.5172
400g.m ⁻²	-1.1915	0.9241	-1.29	0.1986
300g.m ⁻²	-0.1923	0.9037	-0.21	0.8317
55/55UV	-0.9418	0.9292	-1.01	0.3119
105/105DW	-0.9385	0.9040	-1.04	0.3003

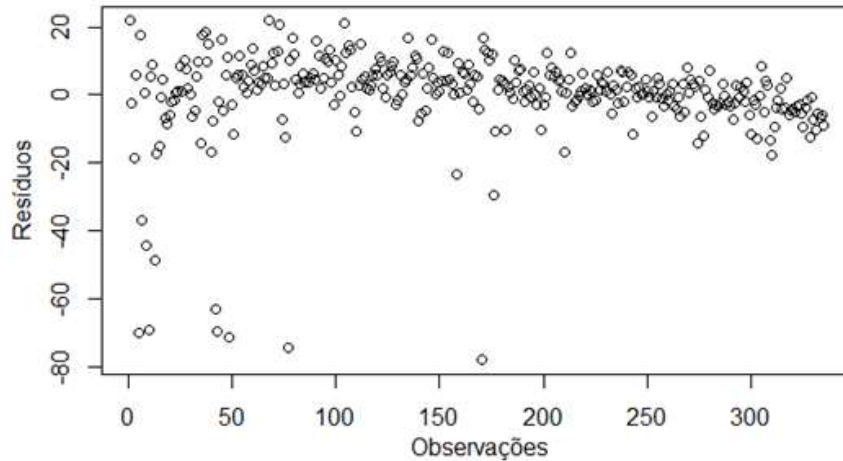
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Sendo assim, há indícios de que na Tabela 5.6 o intercepto (que contém a variável Lodo da 1° campanha e Geotêxtil NT 500g.m⁻²), a %ST, Lodo da 2° campanha, e Altura da camada de lodo são significantes na variável resposta porcentagem do drenado em relação ao volume de lodo aplicado.

5.3.3 Porcentagem do drenado com Cor Aparente Inferior a 75 uH (modelo 3)

Foi realizado um terceiro modelo, seguindo a equação (4.6), sendo a variável resposta à porcentagem do drenado com cor aparente inferior a 75uH, com 335 observações. Com base na Figura 5.19, verifica-se que a variância é aparentemente constante apesar dos outliers.

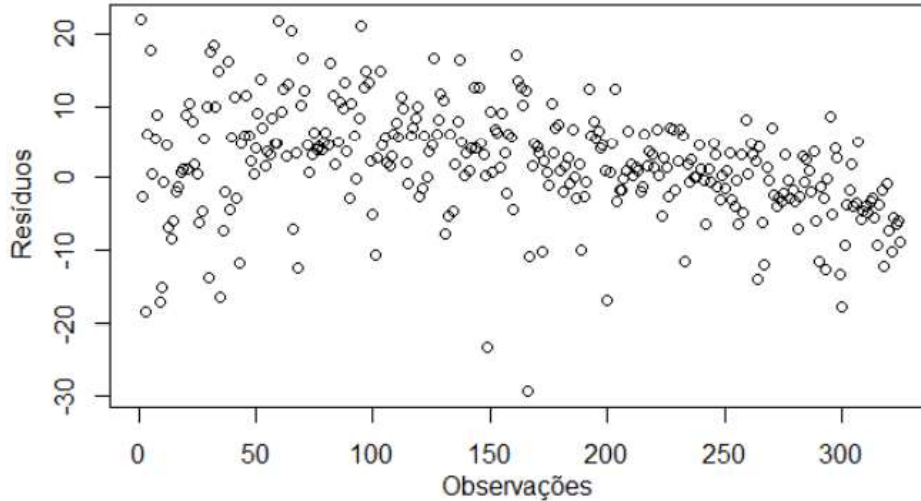
Figura 5.19 - Gráfico dos resíduos para o modelo 3, Porcentagem do drenado com Cor Aparente Inferior a 75 uH



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

A regressão que gerou os erros da Figura 5.19 apresentou um R^2 de 0.29, ou seja, é uma proporção muito baixa da representatividade das variáveis regressoras do modelo e não é um bom ajuste para a variável resposta. Para contornar esse problema e tentar melhorar o valor do coeficiente de determinação, foram retiradas 10 outliers dos dados. A maioria dos outliers está associada a leituras com altura de aplicação de lodo de 10cm. Com a retirada dos outliers, o valor de R^2 passou a ser 0,57, o que indicou uma melhora, mas ainda assim é um coeficiente que aponta pouca representatividade da regressão. Com isso, a nova distribuição de erro pode ser observada na Figura 5.20.

Figura 5.20 - Gráfico dos resíduos para o modelo 3, Porcentagem do drenado com Cor Aparente Inferior a 75 uH, após retirada dos outliers



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Na Tabela 5.7 tem-se os valores da regressão para a porcentagem do drenado com cor inferior a 75uH.

Tabela 5.7 - Tabela com a descrição do ajuste do modelo 2

R ² =0,57	(β) Estimativa	Desvio Padrão	Valor t	P-Valor
Intercepto	61,5699	1,6996	36,23	< 2e ⁻¹⁶
%ST	3,6369	0,5278	6,86	2.87e ⁻¹¹
Lodo 2° Camp.	4,6141	0,8581	5,38	1.45e ⁻⁰⁷
H lodo	0,5206	0,03	17,36	< 2e ⁻¹⁶
600g.m ⁻²	-5,5636	1,4805	-3,76	0.0002
400g.m ⁻²	-2,1260	1,4513	-1,46	0,1439
300g.m ⁻²	-1,6545	1,4805	-1,12	0,2646
55/55UV	1,2364	1,4805	0,84	0,4043
105/105DW	-10,2727	1,4805	-6,94	2.14e ⁻¹¹

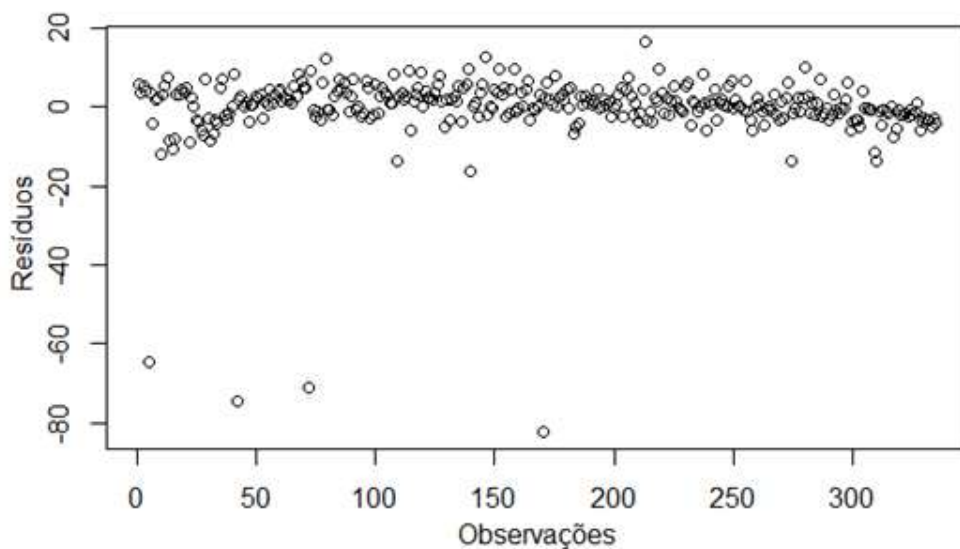
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Na Tabela 5.7 pode-se verificar que as variáveis %ST, Lodo da 2° campanha de coleta, Altura da camada de lodo aplicada, os geotêxteis de 600g.m⁻², 105105DW e o intercepto (que contém as variáveis lodo da 1° campanha e geotêxtil NT de 500g.m⁻²) são significantes, considerando um nível de significância de 0.05 para o P-Valor.

5.3.4 Porcentagem do drenado com Turbidez Inferior a 40 uT (modelo 4)

Por fim, nesse último modelo a variável resposta será a porcentagem do drenado com turbidez inferior a 40uT, conforme a equação (4.6) e com 335 observações. Analisando os resíduos da regressão, que pode ser visto na Figura 5.21 percebe-se que a variância dos erros aparenta ser constante apesar dos outliers.

Figura 5.21 - Gráfico dos resíduos para o modelo 4

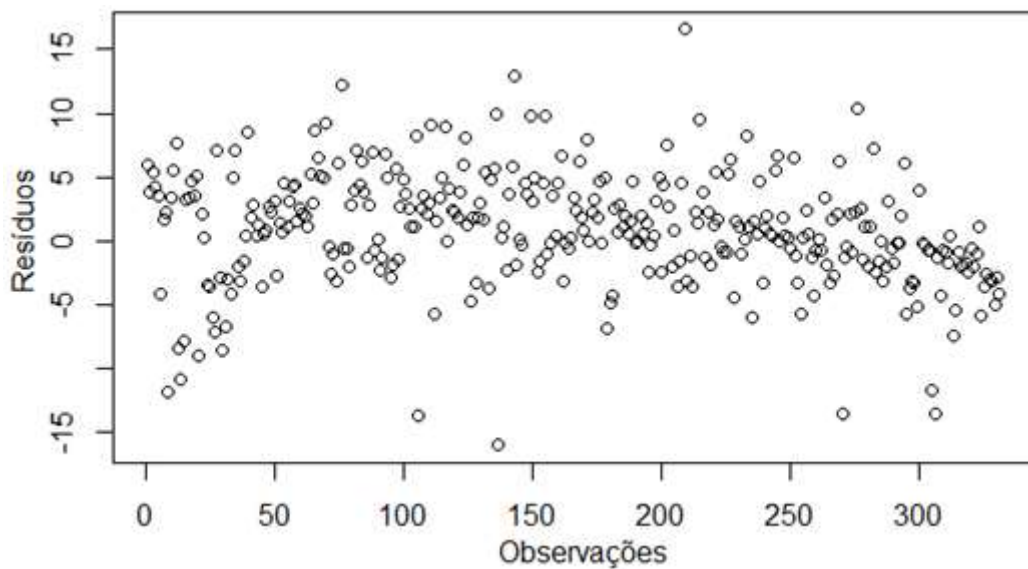


Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Retirando os outliers, confirma-se que a variância é constante na Figura 5.22 e como as estimativas não se alteram após essa modificação, é preferível retirar os outliers pois o R^2 (proporção que representa uma medida do quanto o modelo se

ajusta aos dados), que antes era 0.28, se torna 0.64. Cabe destacar que a maioria dos outlier retirados estão associados às drenagens com o geotêxtil 105/105DW, que conforme discutido na seção 5.3.4, apresenta menor desempenho para o parâmetro turbidez quando comparado com os demais.

Figura 5.22 - Gráfico dos resíduos para o modelo 4 retirando os outliers



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Assim, a descrição do ajuste pode ser evidenciada na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Tabela com a descrição do ajuste do modelo 4

$R^2=0,64$	(β) Estimativa	Desvio Padrão	Valor t	P-Valor
Intercepto	80.8063	0.9903	81.60	$< 2e^{-16}$
%ST	2.1807	0.3075	7.09	$8.29e^{-12}$
Lodo 2° Camp.	1.9441	0.5000	3.89	0.0001
H lodo	0.2284	0.0175	13.07	$< 2e^{-16}$
600g.m ⁻²	1.9091	0.8626	2.21	0.0276
400g.m ⁻²	1.4214	0.8456	1.68	0.0937
300g.m ⁻²	0.5273	0.8626	0.61	0.5415

55/55UV	-1.6182	0.8626	-1.88	0.0616
105/105DW	-11.7455	0.8626	-13.62	$< 2e^{-16}$

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

De acordo com a Tabela 5.8, a um nível de significância α igual a 0,05, tem-se significância nas variáveis %ST, altura da camada de Lodo (H), intercepto (que contém as variáveis 1° Campanha de coleta e o Geotêxtil NT de 500g.m⁻²), Lodo da 2° campanha, e, nesse caso, os Geotêxtis 105/105DW e NT de 600g.m⁻².

5.3.5 Análise crítica das regressões

Os gráficos dos resíduos de cada regressão indicam o quanto os valores estimados se distanciaram dos valores observados nos experimentos, e, de maneira geral, a amplitude dos resíduos ou sua distribuição apresentando padrões, podem indicar se a abordagem utilizada para prever resultados de um fenômeno pouco determinístico, foi pouco satisfatória, devido à imprevisibilidade do fenômeno associado.

Os valores dos coeficientes determinação (R^2) dos modelos 3 e 4, que estimam a porcentagem dos drenados com qualidade dentro dos valores de cor aparente e turbidez estabelecidos, indicam uma representatividade média do modelo. No entanto, observar-se consideráveis amplitudes dos erros, da ordem de 10% para o parâmetro de turbidez e de 15% para os parâmetros de cor aparente. Ao observar os valores das porcentagem dos drenados com turbidez inferior a 40uT e cor inferior a 75 uH nas Tabelas do Apêndice I e nos histogramas do Apêndice II, de maneira geral, nota-se que não houve grandes diferenças nas porcentagens frente às variações dos parâmetros de entrada, e embora a sistematização dos resultados dos parâmetros de cor e turbidez em porcentagem do drenado seja eficiente do ponto de vista prático para verificar a eficiência das drenagens, utilizar essa mesma abordagem na variável resposta das regressões para tentar prever a interferência dos parâmetros de entrada na cor e turbidez dos drenados se mostrou pouco efetiva. Além disso, pôde-se notar

que o fenômeno estudado apresenta uma certa aleatoriedade, o que dificulta ainda mais as previsões.

Apesar da regressão do modelo 2 (porcentagem do drenado em relação ao volume de lodo aplicado) ter apresentado um padrão na distribuição dos erros, o que indica que a regressão pode não ser um bom modelo, a mesma apresentou um valor de R^2 igual 0.74, o que pode ser considerado um bom valor. Os erros observados apresentaram em sua maioria uma amplitude de 5%, o que pode ser considerado uma boa estimativa. Além disso, o valor de β_1 alto e negativo indica que o parâmetro %ST é o mais relevante no modelo, e a porcentagem drenada decai à medida que se aumenta a %ST, o que corrobora com os valores de correlação observados na seção 5.2.3 e 5.2.7. O valor de β_3 positivo e significativo, corrobora com as observações feitas na seção 5.2.5 e com as correlações, que indicam maiores porcentagens drenada em ensaios com lodo da 2° campanha de coleta.

A regressão do modelo 1 para estimar o fim das drenagens em dia apresentou um R^2 com o valor de 0.86, o que indica uma boa representatividade do modelo, o que era de se esperar, visto que a abordagem proposta concentrou muitas observações nos tempos iniciais, 0,5 e 1 dia. No entanto, o grande valor de desvio padrão observado nos histogramas de Fim da Drenagem em Dias para os leitos com maiores TAS indica grande aleatoriedade do fenômeno. Ao observar a distribuição dos resíduos antes da transformação na Figura 5.17, verificam-se amplitudes no erro de até 8 dias, sendo que estes são erros advindos da estimativa para os leitos com maiores %ST e maiores alturas, o que pode indicar que essa regressão não é um bom modelo para prever drenagens com alta TAS.

5.3.6 Utilização prática do modelo de regressão para estimar o fim das drenagens

Os valores das correlações entre as variáveis indicam que os valores de %ST, Altura do lodo e a TAS são diretamente proporcionais à porcentagem de drenado com melhor qualidade, ou seja, dentro da faixa de valores analisados, quanto maior os

valores destes parâmetros de entrada, maior será a porcentagem de drenado com melhor qualidade. Ademais, verificou-se que o tempo para terminar as drenagens também tem uma relação direta com essas variáveis de entrada.

Ao observar as correlações, verifica-se que a TAS foi o parâmetro que apresentou maior correlação com o tempo para término dos fluxos nos leitos, sendo este parâmetro diretamente relacionado à %ST e altura de camada de lodo.

Admitindo que o teor de sólidos dos lodos das ETAs é um parâmetro que varia de acordo com as características operacionais de cada estação, ou seja, dependem do tipo de sistema de tratamento, do tempo de acúmulo dos lodos nos decantadores, da forma de remoção do lodo e da qualidade da água bruta, o ponto ótimo de operação de um sistema de LD pode ser determinado verificando qual a melhor altura de aplicação de lodo no leito para cada faixa de %ST, estipulando um tempo limite para o encerramento das drenagens e início da secagem do lodo por evaporação.

No desaguamento de lodo de ETA em LD, de maneira geral, deseja-se que o tempo de desaguamento do lodo seja o menor possível, a fim de que o planejamento de limpeza dos decantadores possa ser feito de modo a evitar precipitações de águas pluviais sobre o LD durante a drenagem, antes do aparecimento das fissuras provocadas pela retração dos sólidos da torta de lodo, no caso de leitos de drenagem sem cobertura.

Fazendo uso da regressão do modelo 1 (Fim da drenagem em dias) para lodos da 1° campanha de coleta, elaborou-se a Tabela 5.9 com intuito de indicar as alturas máximas de aplicação de lodo para cada faixa de %ST considerando um horizonte de até 5 dias. Analisando os erros desta regressão, verificou-se que as maiores amplitudes estão concentradas em ensaios com TAS na faixa de 10 kg.m^{-2} a 15 kg.m^{-2} . Este erro está relacionado à grande aleatoriedade nos términos das drenagens para LDs com altas TAS, fato que pode ser observado no histograma 23 do Apêndice II. Sendo assim, na elaboração da Tabela 5.9, não foram consideradas combinações com TAS superiores a 10 kg.m^{-2} .

Tabela 5.9 - Altura máxima de aplicação de lodo para término das drenagens em até 5 dias, considerando diferentes %ST estudadas, para os ensaios com TAS abaixo de 10 Kg.m-2

1 dia		2 dias		3 dias		4 dias		5 dias	
%ST	Hmá x (cm)	%ST	Hmá x (cm)	%ST	Hmá x (cm)	%ST	Hmá x (cm)	%ST	Hmá x (cm)
0,5	31	0,5	44	0,5	52	0,5	57	0,5	61
1	26	1	39	1	47	1	52	1	56
1,5	21	1,5	34	1,5	42	1,5	47	1,5	51
2	16	2	29	2	37	2	42	2	46
2,5	10	2,5	24	2,5	31	2,5	37	2,5	*
3	7	3	18	3	26	3	32	3	*

* Fora da TAS considerada.

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Em um LD em escala real, a utilização da Tabela 5.9, para considerar a altura máxima de aplicação do lodo para que a drenagem tenha a duração do intervalo proposto, pode ser conservadora, pois em sua elaboração não foram considerados os efeitos do carregamento lento do lodo sobre o leito, o incremento da taxa de vazão devido ao fenômeno da transmissividade e o efeito da evaporação a céu aberto. Desse modo, pode-se considerar que as alturas máximas (Hmáx), apresentadas na Tabela 5.9 podem ser superadas em escala real quando se tem os efeitos da transmissividade, carregamento e evaporação.

Além disso, ao observar o histograma 29 do Apêndice II, com os tempos de término das drenagens para os lodos da primeira e segunda campanha de coleta, nota-se consideráveis diferenças no tempo de término das drenagens, que evidenciam que as diferenças observadas nos ensaios de caracterização dos lodos, que serão discutidas a seguir, podem influenciar nas taxas de vazão. Tal constatação indica que os valores da Tabela 5.9 podem variar e também dependem do tipo de lodo de cada ETA.

5.4 QUALIDADE DO LÍQUIDO DECANTADO SOBRE OS LEITOS

Observou-se nos ensaios de drenagem realizados com lodo da primeira campanha de coleta que os leitos com maiores taxa de aplicação de sólidos não terminaram suas drenagens no período de observação, geralmente 48 horas. Com a finalidade de propor mecanismos para acelerar o processo de desaguamento, verificou-se a possibilidade de retirada da água decantada (sobrenadante) sobre o leito após o período de observação.

Foram retiradas amostras de 100ml do decantado em 24 drenagens realizadas, com lodo da segunda campanha de coleta, para os leitos onde ainda havia a presença de água livre sobrenadante. Considerou-se a medição dos mesmos parâmetros observados para os drenados, nos líquidos decantados. Na Tabela 5.10 pode-se constatar os valores das medições e as drenagens de onde foram retiradas as amostras. A observação da fração de água decantada sobre os leitos pode ser verificada na Figura 5.7 da seção 5.1.

Tabela 5.10 - Qualidade dos líquidos decantados sobre os leitos para os ensaios que não finalizaram no período de observação dos ensaios

Geotêxtil	Ensaio	%ST	H lodo (cm)	pH	Turbidez uT	Cor aparente uH
600 g.m ⁻²	49	1,5	50	7,53	1,87	19
400 g.m ⁻²	51	1,5	50	7,31	8,14	60
55/55 UV	53	1,5	50	7,16	4,62	34
600 g.m ⁻²	55	2	40	7,29	4,64	33
600 g.m ⁻²	55	2	50	7,27	4,97	42
500 g.m ⁻²	56	2	40	7,29	4,42	46
500 g.m ⁻²	56	2	50	7,35	3,05	45
400 g.m ⁻²	57	2	40	7,46	3,6	1
400 g.m ⁻²	57	2	40	4,57	3,7	1
300 g.m ⁻²	58	2	50	6,75	3,72	47

55/55 UV	59	2	40	7,4	7,17	31
55/55 UV	59	2	50	7,42	3,76	20
105/105 DW	60	2	40	7,01	5,78	59
105/105 DW	60	2	50	6,83	7,19	41
600 g.m ⁻²	61	2,5	40	6,99	3,92	20
600 g.m ⁻²	61	2,5	50	7,02	3	18
500 g.m ⁻²	62	2,5	40	6,78	4,53	14
500 g.m ⁻²	62	2,5	50	6,84	3,53	4
400 g.m ⁻²	63	2,5	40	6,84	10,3	61
400 g.m ⁻²	63	2,5	50	6,89	9,4	42
300 g.m ⁻²	64	2,5	40	6,89	10,2	64
300 g.m ⁻²	64	2,5	50	6,91	9,2	31
55/55 UV	65	2,5	40	6,98	7,61	42
55/55 UV	65	2,5	50	6,98	7,19	65
105/105 DW	66	2,5	50	7,35	2,83	11

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Em relação à qualidade dos líquidos decantados sobre os leitos, a maioria das medições obteve valores para o parâmetro de turbidez compatíveis com a condição III de enquadramento dos drenados, com valores inferiores a 10uT. Para o parâmetro de cor aparente, verificou-se que todas as amostras obtiveram o valor de cor aparente inferior a 75uH.

Tais observações indicam a possibilidade de implementação de mecanismos para retirada de água decantada sobre os leitos, que apresentaram boa qualidade para os parâmetros de cor aparente e turbidez, com valores compatíveis com a qualidade dos líquidos drenados, o que aceleraria o processo de drenagem em leitos com maiores TAS.

5.5 TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS DO LODO RETIDO NO LEITO APÓS O TÉRMINO DA DRENAGEM

Após o período de observação das drenagens, foram coletas amostras da torta formada pelos sólidos retidos nos geotêxtis para a mensuração do teor de sólidos totais resultante do processo. As amostras foram coletadas antes de se observarem as rachaduras formadas pela retração dos sólidos do lodo devido à evaporação. Na Figura 5.24 pode-se observar a “torta” resultante do processo de drenagem.

Figura 5.23 - Massa de lodo retida nos leitos após os desaguamentos por LD



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Foram realizadas ao todo 140 medidas do teor de sólidos totais dos lodos retidos nos geotêxteis. Os valores de cada drenagem e as médias por ensaio e altura de camada de lodo podem ser observados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Teor de sólidos retidos no leito após o término da drenagem para segunda campanha de coleta de amostras

Teor de sólidos do lodo retido no leito após o término da drenagem								
%ST	Geotêxtil	Campanha de coleta de lodo	Altura da camada de lodo aplicada					Média do ensaio
			10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	
0,5	600 g.m ⁻²	2	14%	12%	10%	15%	11%	12%
0,5	500 g.m ⁻²	2	13%	13%	12%	7%	11%	11%
0,5	400 g.m ⁻²	2	14%	13%	10%	14%	11%	12%
0,5	300 g.m ⁻²	2	19%	13%	16%	17%	12%	15%
0,5	55/55 UV	2	9%	10%	13%	7%	11%	10%
0,5	105/105 DW	2	11%	10%	10%	14%	11%	11%
1	600 g.m ⁻²	2	13%	11%	10%	11%	9%	11%
1	500 g.m ⁻²	2	13%	12%	15%	14%	12%	13%
1	400 g.m ⁻²	2	14%	11%	13%	15%	11%	13%
1	300 g.m ⁻²	2	14%	12%	14%	13%	11%	13%
1	55/55 UV	2	11%	11%	11%	10%	9%	10%
1	105/105 DW	2	12%	12%	14%	13%	12%	13%
1,5	600 g.m ⁻²	2	14%	12%	14%	15%	10%	13%
1,5	500 g.m ⁻²	2	15%	14%	15%	14%	13%	14%
1,5	400 g.m ⁻²	2	11%	12%	15%	14%	11%	12%
1,5	300 g.m ⁻²	2	12%	12%	12%	14%	9%	12%
1,5	55/55 UV	2	11%	12%	15%	14%	11%	12%
1,5	105/105 DW	2	13%	12%	13%	14%	14%	13%
2	600 g.m ⁻²	2	14%	12%	14%	11%	10%	12%
2	400 g.m ⁻²	2	14%	13%	15%	10%	10%	12%
2	300 g.m ⁻²	2	14%	12%	16%	13%	12%	14%
2	55/55 UV	2	13%	12%	12%	12%	10%	12%
2	105/105 DW	2	14%	12%	15%	12%	11%	13%
2,5	600 g.m ⁻²	2	14%	14%	12%	12%	12%	13%
2,5	500 g.m ⁻²	2	14%	13%	13%	13%	16%	14%
2,5	400 g.m ⁻²	2	14%	12%	16%	10%	11%	13%

2,5	300 g.m ⁻²	2	12%	14%	15%	10%	9%	12%
2,5	55/55 UV	2	12%	13%	13%	11%	19%	14%
2,5	105/105 DW	2	13%	13%	15%	14%	22%	15%
Média por altura			13%	12%	13%	12%	12%	-
Amplitude por altura			9% a 19%	10% a 14%	10% a 16%	7% a 17%	9% a 22%	-

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

As médias observadas por tipo de geotêxtil são de 12% para o geotêxtil tecido de 600 g.m⁻² e para o geotêxtil tecido 105/105DW. Para os demais geotêxteis a média foi de 13%. Verificou-se uma média de %ST final de 13% considerando todas as medições, com um desvio padrão de 2%, sendo que o maior valor do teor de sólidos foi de 22% e o menor foi de 7%.

Apesar dos valores extremos de 22% e 7% nos teores de sólidos observados, os valores das médias por altura de camada de lodo aplicado, por tipo de geotêxtil, e o valor de desvio padrão de apenas 2% indicam que a altura de camada de lodo e o tipo de geotêxtil têm pouca influência no teor de sólidos do retido. A amplitude observada pode ser em decorrência do tamanho da amostra retirada para a medição do teor de sólidos ser pouco representativa do total retido em cada leito, visto que o volume total retido não foi homogeneizado para a coleta da amostra.

5.6 RESULTADOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LODO E GEOTÊXTEIS

Nesta seção serão apresentados e discutidos os ensaios realizados para a caracterização dos lodos e dos geotêxtis utilizados nessa pesquisa. Foram realizados ensaios para a caracterização dos lodos das duas campanhas de coleta e dos seis tipos de geotêxteis utilizados. Os ensaios serão discutidos a fim de se levantarem as diferenças entre os lodos das duas campanhas e entre os geotêxteis, e verificar como essas diferenças impactaram no processo de desaguamento de lodo de ETA em LD.

5.6.1 Valores de concentração de metais, série de sólidos e Carbono Orgânico Total para os lodos brutos

Na Tabela 5.12 encontram-se os resultados de caracterização do lodo bruto da primeira e segunda campanha de coleta, além dos valores limite para lançamento de efluentes segundo o CONAMA 430/2011, e os valores encontrados por Cordeiro (2000), para a caracterizações dos lodos coletados na mesma estação.

Tabela 5.12 - Resultados das análises de concentrações de metais, série de sólidos e COT para os lodos da 1° e 2° campanha de coleta

Análise	Resultado 1° campanha de coleta	Resultado 2° campanha de coleta	Referência / Procedimento	Cordeiro (2000)	Padrão de lançamento (CONAMA 430/2011)
Cobre	3,212 mg/L	3,953 mg/L	SMWW 3120 B / POP-SL 001	2,06 mg/L	1,0 mg/L
Cromo	3,747 mg/L	5,523 mg/L	SMWW 3120 B / POP-SL 001	1,58 mg/L	1,0 mg/L
Ferro	5.862,736 mg/L	5.776,736 mg/L	SMWW 3120 B / POP-SL 001	5.000 mg/L	15,0 mg/L
Manganês	155,35 mg/L	328,48 mg/L	SMWW 3120 B / POP-SL 001	60 mg/L	1,0 mg/L
Níquel	0,81 mg/L	0,863 mg/L	SMWW 3120 B / POP-SL 001	1,8 mg/L	2,0 mg/L
Chumbo	0,529 mg/L	0,519 mg/L	SMWW 3120 B / POP-SL 001	1,6 mg/L	0,5 mg/L
Alumínio	6.477,332 mg/L	7.539,332 mg/L	SMWW 3120 B / POP-SL 001	11.100 mg/L	-
Zinco	4,714 mg/L	8,673 mg/L	SMWW 3120 B / POP-SL 001	4,25 mg/L	5,0 mg/L
Sólidos Dissolvidos Totais	25.470 mg/L	38.764 mg/L	SMWW 2540 C	32.110 mg/L	-
Sólidos Sedimentáveis	1.000,0 mL/L	900,0 mL/L	SMWW 2540 F	-	-
Carbono Orgânico Total	77.877 mg/L	40.263 mg/L	POP-SL 010	-	-
Sólidos Totais	124.703 mg/L	110.530 mg/L	SMWW 2540 B	58.630 mg/L	-
Sólidos Suspensos Fixos	73.663 mg/L	52.833 mg/L	SMWW 2540 D	-	-

Sólidos Suspensos Voláteis	25.600 mg/L	18.933 mg/L	SMWW 2540 E		-
pH	6,52	6,88	APHA/AWWA/WEF, 2005, EAA		Entre 5 e 9

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Observando a concentração de metais presentes nas amostras de lodo, já como esperado, verifica-se que todas as concentrações excederam ao limite para padrões de lançamento de efluente estabelecidos pela resolução CONAMA 430/2011. Comparando os resultados entre os lodos da primeira e segunda campanha de coleta, observa-se, de maneira geral, maiores concentrações de metais para o lodo da segunda campanha de coleta, principalmente para os elementos manganês e zinco, mesmo os lodos da segunda campanha tendo apresentado menor concentração de sólidos totais.

Os valores de sólidos totais observados na tabela 5.12 foram distintos dos valores médios observados antes das diluições para a realização dos ensaios de desaguamento em LD. Tal diferença pode ser explicada pelo fato de os ensaios de caracterização dos lodos terem sido executados após a realização dos ensaios de desaguamento, fazendo com que as amostras de lodo bruto tenham ficado armazenadas por mais tempo nas bombonas antes da realização dos ensaios de caracterização, o que pode ter promovido o adensamento da amostra ensaiada.

Verifica-se na literatura grandes variações nas concentrações de metais em lodos de estação de tratamento de água, pois são parâmetros que estão diretamente relacionados com a qualidade da água bruta, com os tipos e qualidade dos produtos químicos utilizados durante o processo de potabilização da água e até com a época do ano em que se coleta as amostras. Comparando com os resultados levantados por Cordeiro (2000) para a mesma ETA, verifica-se valores semelhantes para as concentrações de metais.

Mesmo os lodos da 1° campanha de coleta apresentando um valor maior que o dobro para a concentração de sólidos totais em relação à 2° campanha de coleta, verificam-se valores semelhantes para os outros parâmetros da série de sólidos.

5.6.2 Valores dos parâmetros físicos e hidráulicos dos geotêxteis utilizados

Na Tabela 5.13 tem-se os resultados dos parâmetros físicos e hidráulicos dos geotêxteis utilizados nessa pesquisa.

Tabela 5.13 - Resultados da caracterização física e hidráulica dos Geotêxteis estudados nessa pesquisa e dos valores apresentados pelos fabricantes

Propriedade	Método	Geotêxteis utilizados na pesquisa					
		600g.m ⁻²	500g.m ⁻²	400g.m ⁻²	300g.m ⁻²	55/55 UV	105/105 DW
*Gramatura (g.m ⁻²)	ASTM D 3776	600	500	400	300	260	525
Gramatura (g.m ⁻²)	NBR ISO 9864:2013	647,94	468,8	420,91	269,79	251,09	469,72
Espessura (mm)	NBR ISSO 9863-1:2013	4,01	3,46	2,78	1,59	0,93	1,74
*Espessura (mm)	(1)	4	3,85	3,05	2,65	0,9	1,81
Permissividade (s ⁻¹)	(3) ABNT NBR ISO 11058 / ASTM D 4491	0,513	0,923	0,627	1,572	0,162	0,867
*Permissividade (s ⁻¹)	ASTM D 4491	0,9	1	1,22	1,5	0,98 ⁽¹⁾	1,371 ⁽¹⁾
*Abertura de filtração (µm)	Norma AFNOR G 38017	30	45	65	80	200 ⁽²⁾	240 ⁽²⁾
*Permeabilidade normal (mm.s ⁻¹)	ASTM D 4491	9	2,1	2,2	2,6	15 ⁽⁴⁾	21,6 ⁽⁴⁾

(*) Valores fornecidos pelos fabricantes; (1) Método não divulgado pelo fabricante; (2) Ensaio realizado conforme NBR ISSO 12956; (3) Ensaio realizado conforme ABNT NBR ISO 11058:2013 valor determinado conforme ASTM D 4491; (4) Ensaio realizado conforme NBR ISO 11058.

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Em relação à Tabela 5.13, verifica-se que os valores dos de espessura e gramatura avaliados nos geotêxtis estão muito próximos dos valores fornecidos por seus fabricantes. O mesmo não pôde ser constatado para o parâmetro de permissividade, onde verifica-se valores discrepantes para os geotêxteis de 400g.m⁻² e 55/55UV.

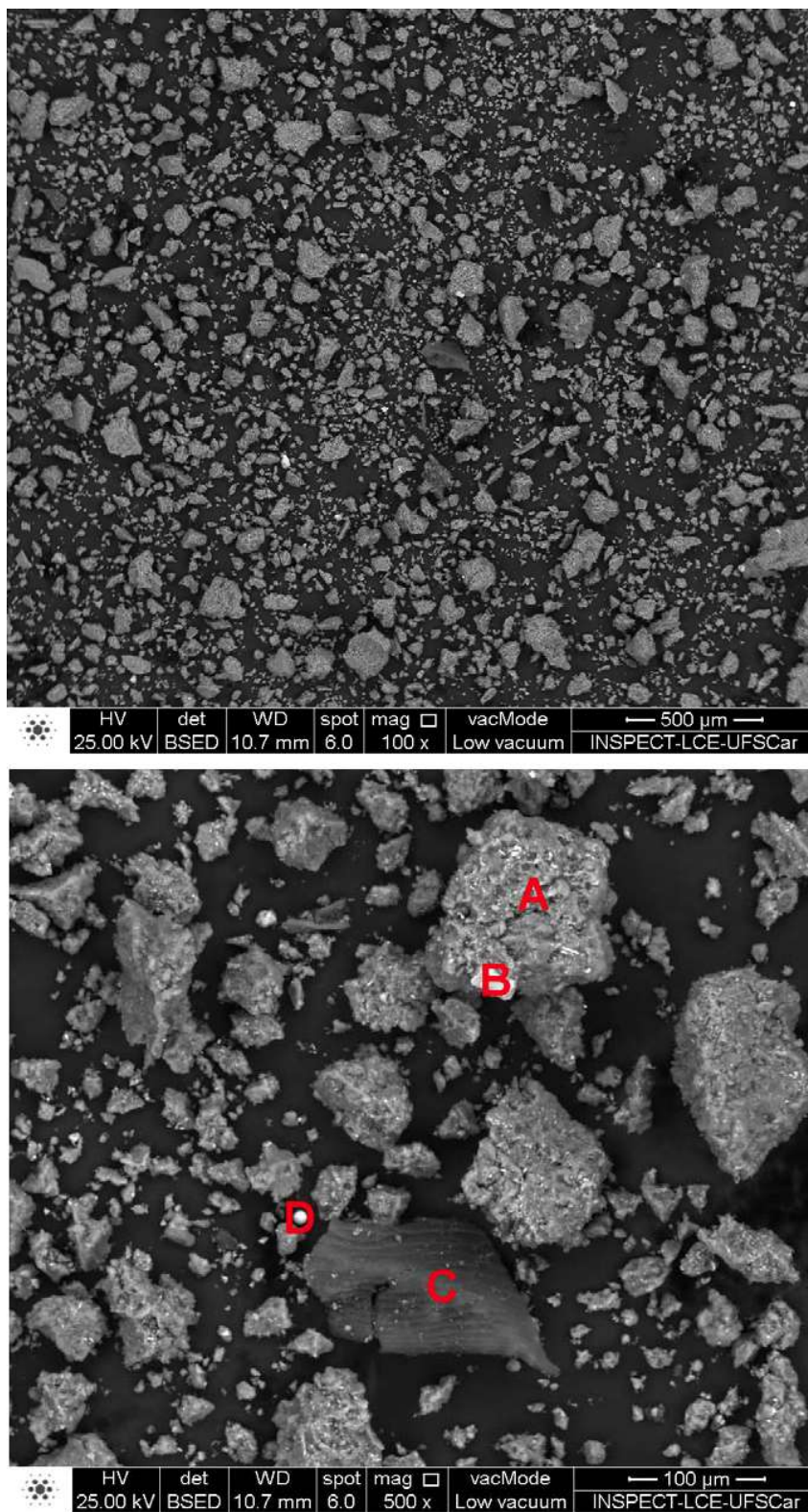
Os parâmetros de abertura de filtração, mesmo sendo determinados por métodos diferentes entre os geotêxtis tecido e não tecido, expressam a capacidade de retenção de certos diâmetros de partícula pelos geotêxteis.

5.6.3 Análises em amostras de lodo bruto por MEV/EDS

Através do Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada, a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (MEV-EDS), foi possível avaliar a micrografia das superfícies das amostras sólidas dos lodos e a identificação qualitativa dos elementos químicos presentes nas amostras de lodos brutos de sulfato de alumínio coletados na ETA São Carlos.

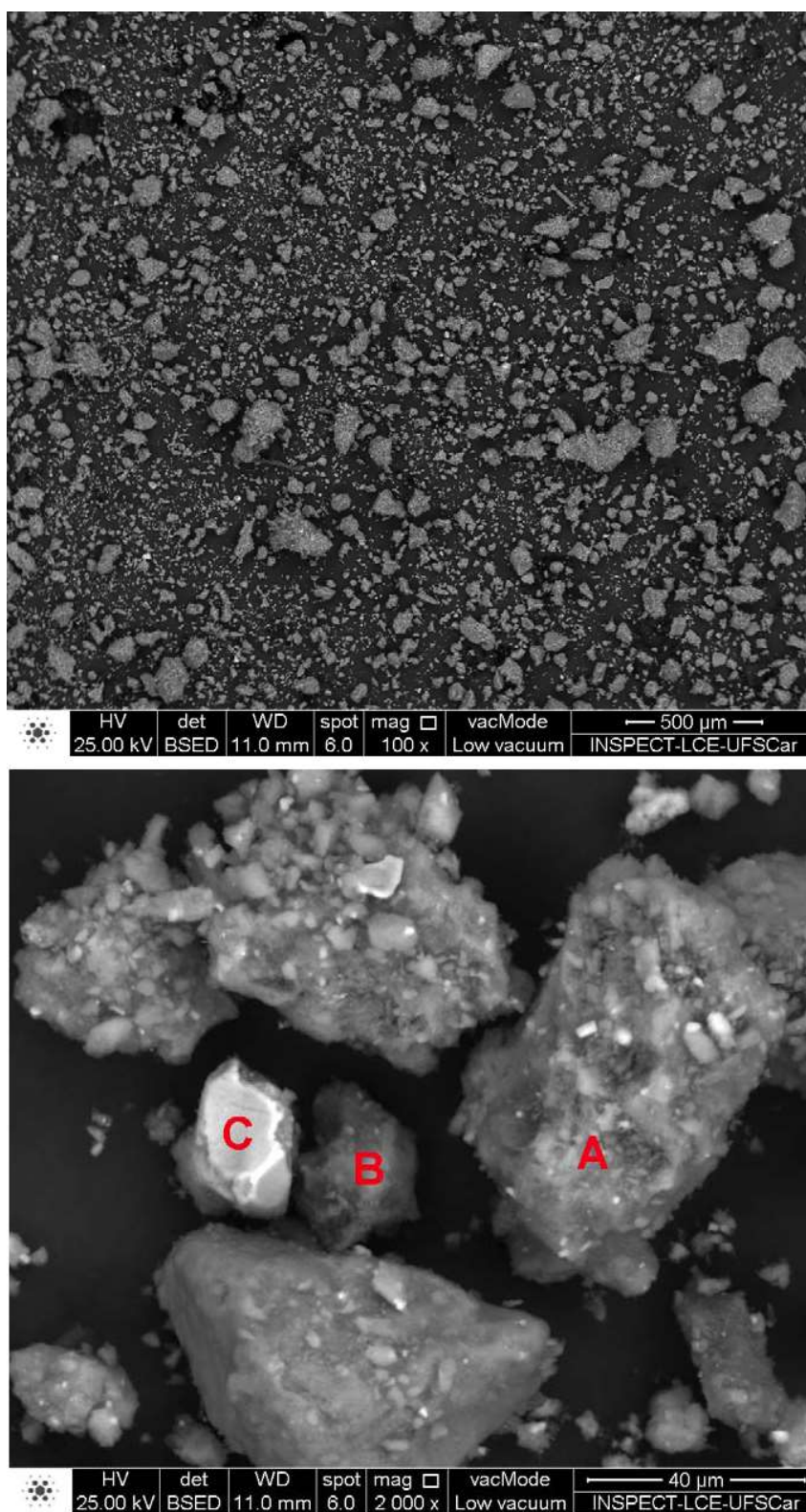
Os resultados das micrografias (MEV) para os lodos da primeira e segunda campanha de coleta estão apresentados respectivamente nas Figuras 5.24 e 5.25, sendo que os elementos químicos de maior número atômico aparecem nas micrografias como pontos mais claros e elementos químicos de menor número atômico aparecem como pontos mais escuros. A porcentagem dos elementos químicos nos pontos observados das amostras pode ser observada na Tabela 5.14.

Figura 5.24 - Micrografias da amostra de lodo da 1ª campanha de coleta - imagens com aumento de 100x e 500x



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.25 - Micrografias da amostra de lodo da 1ª campanha de coleta - imagens com aumento de 100x e 2000x



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Tabela 5.14 - Porcentagem dos elementos químicos nos pontos observados nas amostras

Teor elementar (%)	1° campanha de coleta				2° campanha de coleta		
	A	B	C	D	A	B	C
O	45,89	25,5	35,2	24,6	40,7	40,6	35,41
Mg	0,38	---	0,65	---	---	---	---
Al	21,09	4,78	23	7,44	21,3	19,7	4,59
Si	14,24	2,22	20	1,58	14,8	14,5	3,13
S	0,34	---	0,75	---	0,43	0,34	---
K	0,17	---	---	---	---	---	---
Ca	0,31	---	1,15	---	0,59	0,48	---
Ti	1,38	31,4	2,21	64,4	1,79	3,99	29,7
Mn	0,39	0,79	---	---	0,59	0,59	0,47
Cr	---	---	---	0,28	---	---	---
Fe	15,81	35,4	17,1	1,72	19,7	19,8	26,7

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

As Figuras 5.24 e 5.25 ilustram um predomínio de partículas do tipo A em ambos os lodos. Consultando a Tabela 5.14, verifica-se que existe grande similaridade entre o elemento do tipo A para os dois lodos, tal partícula apresenta predomínio dos elementos silício, alumínio e ferro. O resultado corrobora as observações feitas por Barroso (2007) para os lodos estudados em sua pesquisa, também utilizando lodos da ETA de São Carlos - SP.

A predominância dos elementos Al, Fe e Si também corrobora com as observações feitas por Dias (2002), que observou a predominância de óxidos de Alumínio, ferro e dióxido de silício (Quartzo) em lodos de sulfato de alumínio coletados na estação de tratamento de água Meia Ponte em Goiânia.

Apesar da similaridade entre os lodos da primeira e segunda campanha de coleta vista na Tabela 5.12, na Tabela 5.14 verificou-se qualitativamente a presença

de elementos distintos, sendo que a verificação exata do tipo de estrutura cristalina, e mais particularmente dos argilominerais presentes nos lodos, foi confirmada pela realização de difração de raios X e será discutida posteriormente.

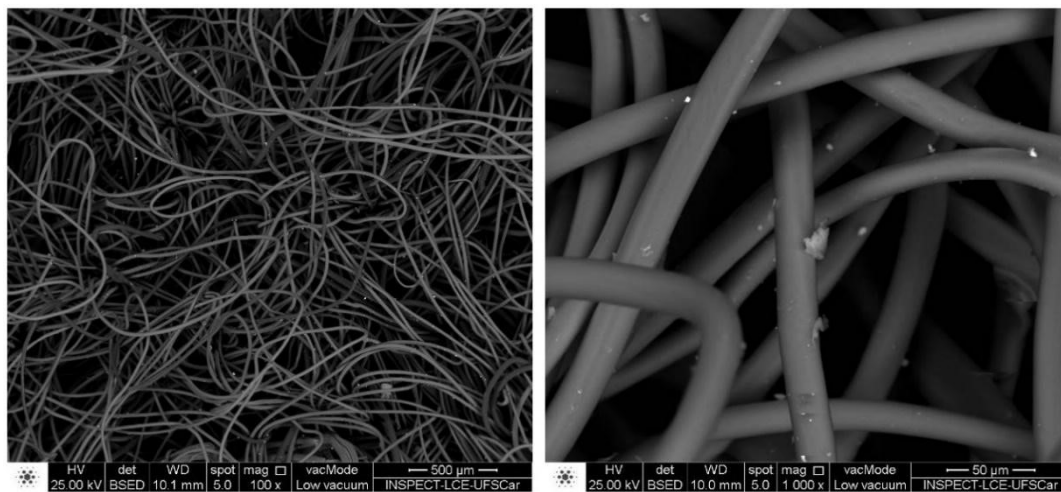
5.6.4 Análises em amostras dos geotêxteis virgens e após drenagens por MEV/EDS

Com o objetivo de avaliar as características dos geotêxteis e avaliar a sua interação com as partículas do lodo, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (MEV/EDS) para os seis tipos de geotêxteis, antes e após o uso nos ensaios, conforme discutido na seção 4.4.2.

5.6.4.1 Análise das amostras dos geotêxteis novos (sem uso)

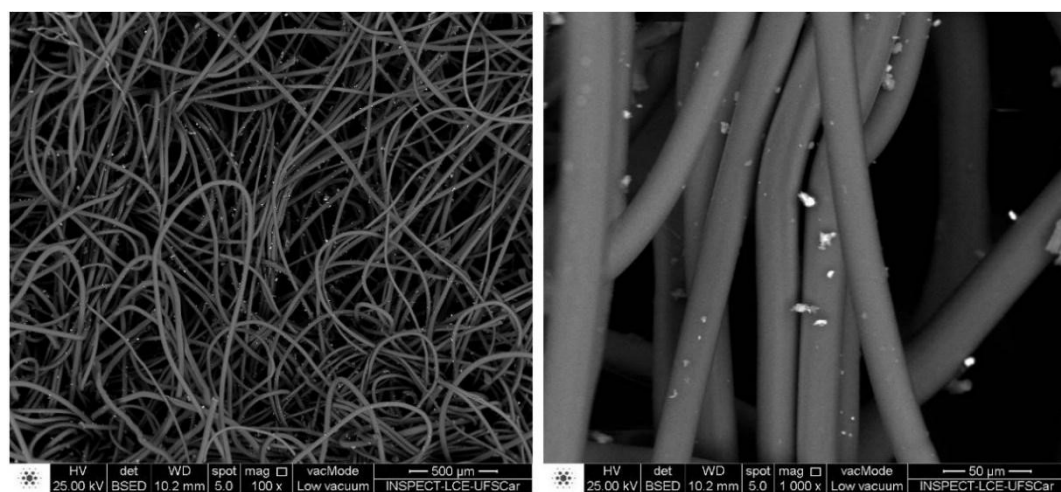
Os resultados das micrografias (MEV) para os geotêxteis antes do uso, conforme fornecidos pelo fabricante, pode ser observado nas Figuras de 5.26 até 5.31. E a Identificação qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presente nas amostras de geotêxteis novos (sem uso) estão na Tabela 5.15.

Figura 5.26 - Micrografias do geotêxtil de 600g.m⁻², imagens com aumento de 100x e 1000x



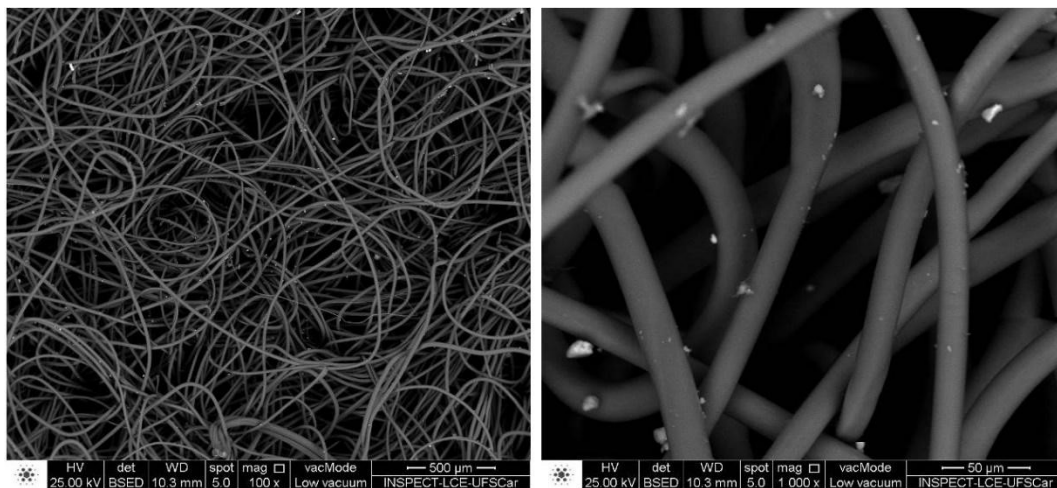
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.27 - Micrografias do geotêxtil de 500g.m⁻², imagens com aumento de 100x e 1000x.



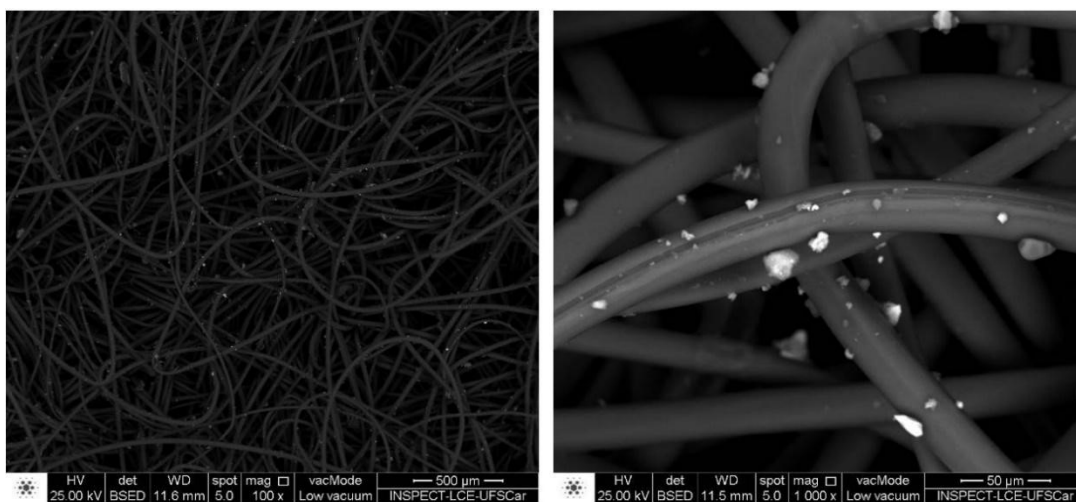
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.28 - Micrografias do geotêxtil de 400g.m⁻², imagens com aumento de 100x e 1000x



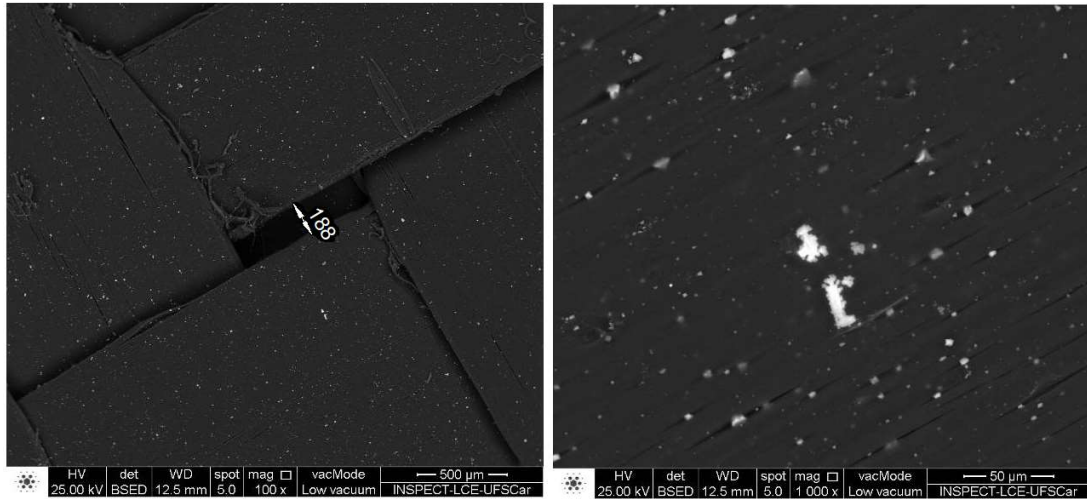
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.29 - Micrografias do geotêxtil de 300g.m⁻², imagens com aumento de 100x e 1000x



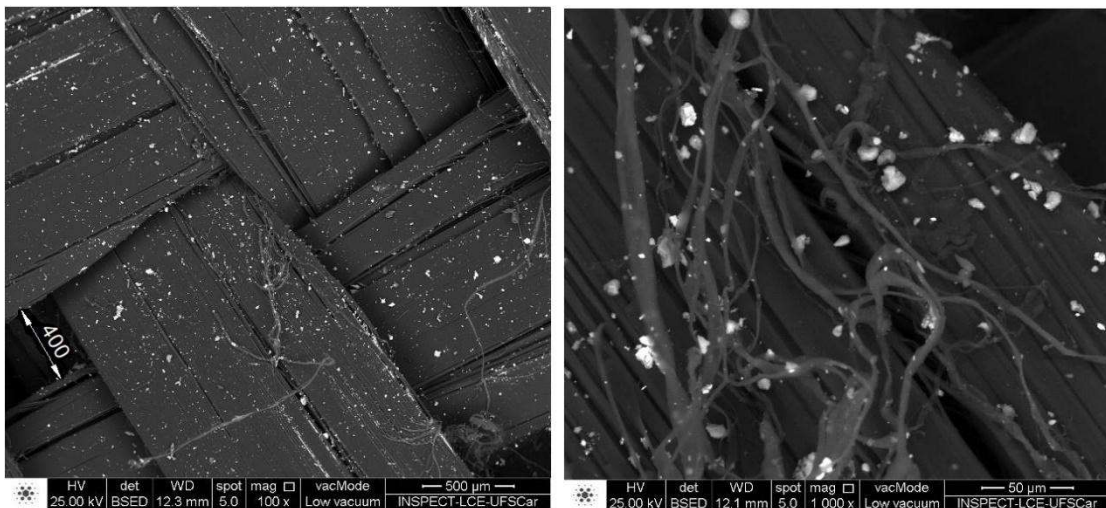
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.30 - Micrografias do geotêxtil de 55/55UV, imagens com aumento de 100x e 1000x



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.31 - Micrografias do geotêxtil de 105/105DW, imagens com aumento de 100x e 1000x



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Tabela 5.15 - Identificação qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presente nas amostras de geotêxteis novos (sem uso)

Elemento	600 g.m ⁻²	500 g.m ⁻²	400 g.m ⁻²	300 g.m ⁻²	55/55UV	105/105DW
C	68,6	59,96	60,61	60,29	90,08	96,47
O	30,82	37,66	37,47	38,53	7,61	2,25
Al	0,27	0,29	---	0,45	0,42	---
Si	0,32	0,55	---	0,73	0,6	---
Ca	---	0,7	---	---	0,32	1,28
Fe	---	0,84	1,92	---	0,97	---

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Para os geotêxteis não tecidos, observa-se aleatoriedade da distribuição das fibras, em geral, com tamanhos muito parecidos. Nas micrografias das amostras ensaiadas não foi possível verificar diferenças significativas no espaçamento entre as fibras, o que pode indicar que a variação dos valores do parâmetro de abertura de filtração fornecidos pela fabricante com os resultados de caracterização realizados conforme Tabela 5.13, parâmetro que indica a capacidade de retenção de certos diâmetros de partícula, está mais associada à espessura do geotêxtil não tecido do que a disposição de suas fibras.

Para os dois geotêxtis tecidos avaliados foi possível verificar aberturas bem delimitadas em alguns pontos das tramas, sendo que o geotêxtil 105/105DW apresentou menor dimensão da abertura da ordem de 400 μ m e o geotêxtil 55/55UV apresentou abertura da ordem de 180 μ m, o que corrobora com os dados de abertura de filtração fornecidos pelos fabricantes dos geotêxteis, onde o geotêxtil 105/105DW apresentou um valor de abertura de filtração superior em relação ao outro geotêxtil tecido.

Na Figura 5.30, relativa ao geotêxtil tecido 105/105DW antes do uso, observam-se minúsculas porções de material aderido e filamentos soltos com as mesmas características observadas por Ardila (2020), que atribui a presença destes filamentos ao processo de fabricação dos geotêxteis.

Ainda observando as micrografias dos geotêxteis novos, pode-se verificar a presença de partículas de tamanhos inferiores a $10\mu\text{m}$, provavelmente de origem do ambiente onde os geotêxteis foram estocados antes da realização dos ensaios. Analisando a Tabela 5.15 com identificação qualitativa dos elementos químicos presente nas amostras, verifica-se que existe a predominância de elementos que constituem o poliéster, que é o polímero que constitui os geotêxteis utilizados nessa pesquisa. Verifica-se também apenas traços de outros elementos como Al, Si, Ca e Fe, mas em menor quantidade e de maneira aleatória entre as amostras, quando comparado com os resultados da análise por EDS para os geotêxteis após as drenagens.

5.6.4.2 MEV dos geotêxteis após as drenagens

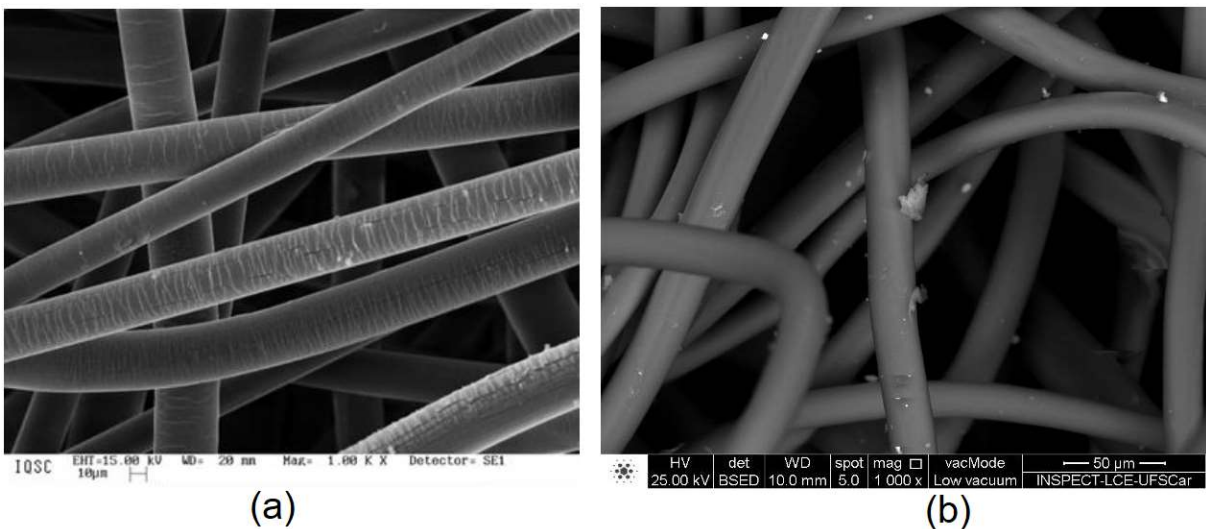
Os resultados das micrografias (MEV) para os geotêxteis usados podem ser observados nas Figuras de 5.33 até 5.38, sendo que todos estes geotêxteis foram submetidos à drenagens utilizando lodos da segunda campanha de coleta de lodo.

As amostras foram ensaiadas após a retirada superficial dos sólidos sobre os geotêxteis depois do final das drenagens, onde já se observava o aparecimento de fissuras “gretas” na torta de lodo devido à retração dos sólidos por evaporação. Verificou-se que a redução do lodo devido ao processo de secagem, promoveu o destacamento da massa de lodo dos geotêxteis e a aglutinação das partículas de lodo, o que possibilitou que estas fossem facilmente removidas. Mesmo com a remoção da maior parte do lodo, ao se observar as micrografias dos geotêxteis após o uso, verifica-se que ainda há a presença de material particulado aderido em suas fibras, com os geotêxteis não tecidos (NT) apresentando maior retenção quando comparados os tecidos.

A maior aderência de partículas de lodo nos geotêxteis NT parece estar mais relacionada com a disposição aleatória das fibras do que com a rugosidade dos filamentos. Ardila (2020) para geotêxteis NT de poliéster observou minúsculas

fissuras em suas fibras, que segundo o fornecedor, são decorrentes da ensimagem utilizada no processo de fabricação para a redução do atrito entre as fibras de poliéster durante o processo de agulhagem. Tal observação não foi feita nos geotêxteis NT estudados nessa pesquisa, mesmo tendo observado similaridade na aderência de partículas de lodo entre as duas pesquisas. Na Figura 5.32, pode-se verificar as diferenças na superfície das fibras dos geotêxteis NT de poliéster estudados por Ardila (2020) e utilizadas nesse trabalho.

Figura 5.32 - (a) Micrografia de geotêxtil NT 100% poliéster estudado por Ardila (2020) com gramatura de 895g.m^{-2} . (b) Micrografia de geotêxtil NT 100% poliéster estudado nessa pesquisa, com gramatura de 600g.m^{-2} . (geotêxteis virgens, imagens com aumento de $1000\times$)



Fonte: Adaptado de Ardila (2020).

Ao observar as micrografias dos geotêxteis após o uso, pode-se verificar a presença de partículas de tamanhos variados, e mesmo havendo o destacamento da maior parte da massa de lodo, ainda verificou-se aglomerações de partículas, causando o cegamento e obstrução das aberturas dos geotêxteis, e contribuindo para a redução da permissividade. Visualmente, verifica-se maior presença de partículas nos geotêxteis Não Tecidos quando comparado aos Tecidos, exceto para o de 600g.m^{-2} . Ressalta-se, porém, que este fato que não deve ser considerado determinístico, tendo em vista que o tamanho da amostra recolhida para a

realização da MEV foi aproximadamente 1 cm², que pode reduzir a representatividade geral do leito e comprometer a análise fria das micrografias.

O fato de as partículas terem se aglutinado com a retração dos sólidos e se destacado facilmente dos geotêxteis, além de comprometer a análise das micrografias na verificação da diminuição da permissividade dos geotêxteis, evidencia que dentre os processos de colmatação discutidos na seção 3.7, o cegamento, quando partículas finas se agrupam e formam uma camada de baixa permeabilidade sobre a face do geotêxtil, pode ser o fator preponderante para a diminuição da permissividade.

Mesmo a maior parte das partículas do lodo tendo se destacado, ainda foi possível observar a retenção de partículas menores que os valores dos parâmetros abertura de filtração, apresentados na Tabela 5.13. Tal constatação corrobora com as observações feitas por Barroso (2007), que indica a ocorrência de dois mecanismos de retenção das partículas, a auto filtração, com o aparecimento do pré-filtro formado pelos sólidos do lodo sedimentados e a formação de uma rede de arcos, conforme cita Freitas (2003), formados pelas partículas retidas adjacentes às aberturas dos geotêxteis, que tendem a redistribuir as tensões verticais devido à força de percolação e força da gravidade, com a formação de arcos, que dificultam a passagem de partículas com diâmetros menores que o das aberturas.

Além disso, a análise dos resultados indica que a ação dos sólidos do lodo sedimentados sobre o LD tem ação preponderante na filtração em relação ao tipo de geotêxtil, e embora os resultados encontrados estejam muito próximos quanto às porcentagens de drenado com cor aparente inferior a 75uH e turbidez inferior a 40uH, apenas o geotêxtil 105/105DW apresentou resultados significativamente inferiores aos demais quanto ao parâmetro de turbidez, conforme Tabela 5.4 e histogramas 01, 02 e 03 do Apêndice II. Tal observação pode estar relacionada à abertura de filtração deste geotêxtil, que apresentou o maior valor deste parâmetro quando comparado com os demais. Verificou-se também que o tempo de término das drenagens não foi influenciado pelo tipo de geotêxtil utilizado.

Analisando a Tabela 5.16 com identificação qualitativa dos elementos químicos presente nas amostras dos geotêxteis após as drenagens, verifica-se o predomínio dos elementos carbono, elemento não encontrado na análise por EDS no lodo da segunda campanha de coleta. O carbono é um dos principais constituintes do poliéster que compõe os geotêxteis utilizados nessa pesquisa. Verifica-se menor concentração deste elemento quando compara-se com a análise elementar para os geotêxteis sem uso, o que era de se esperar, visto que houve retenção de sólidos do lodo nas amostras. Verifica-se que existem diferenças significativas quando compara-se com a composição dos elementos retidos nos ensaios antes da drenagem, onde verifica-se a presença de maior variabilidade elementar e maiores frações dos elementos Al, Si e Ca e Fe. Dentre esses elementos, o Ferro foi o que apresentou maiores frações, em todas as amostras.

A análise por EDS permite concluir que a observação visual feita nas micrografias, onde se constatou maior retenção de sólidos nos geotêxteis NT foi consistente, visto que os geotêxteis tecidos apresentaram menor variação de elementos quando compramos os resultados para o geotêxtil antes e após o uso.

Na Tabela 5.14, com a identificação dos elementos químicos dos lodos brutos, verifica-se valores maiores do elemento Al em relação ao elemento Fe para a partícula do tipo A, que é a partícula com predominância nos dois lodos. No entanto, ao observar-se a Tabela 5.16, nota-se que o elemento Fe maiores porcentagens em relação ao elemento Al, o que pode ser um indício de que os geotêxteis promovem uma maior retenção deste elemento.

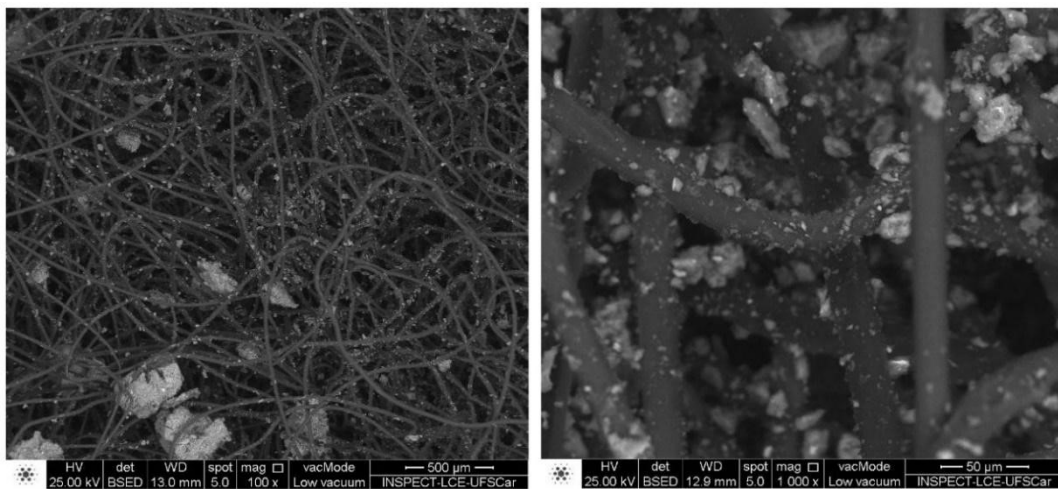
Tabela 5.16 - Identificação qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presente nas amostras de geotêxteis após as drenagens

Elemento	600 g.m⁻²	500 g.m⁻²	400 g.m⁻²	300 g.m⁻²	55/55UV	105/105DW
C	49,68	35,33	40,23	36,68	81,42	74,64
O	32,24	36,67	36,25	37,61	13,72	18,38
Al	4,12	7,97	6,58	8,04	1,27	2,02
Si	2,52	4,96	4,18	5	0,78	1,53

Ca	0,39	---	---	---	0,78	0,26
Ti	0,99	1,44	1,06	0,99	---	0,42
Fe	10,06	13,63	11,7	11,69	2,03	2,74

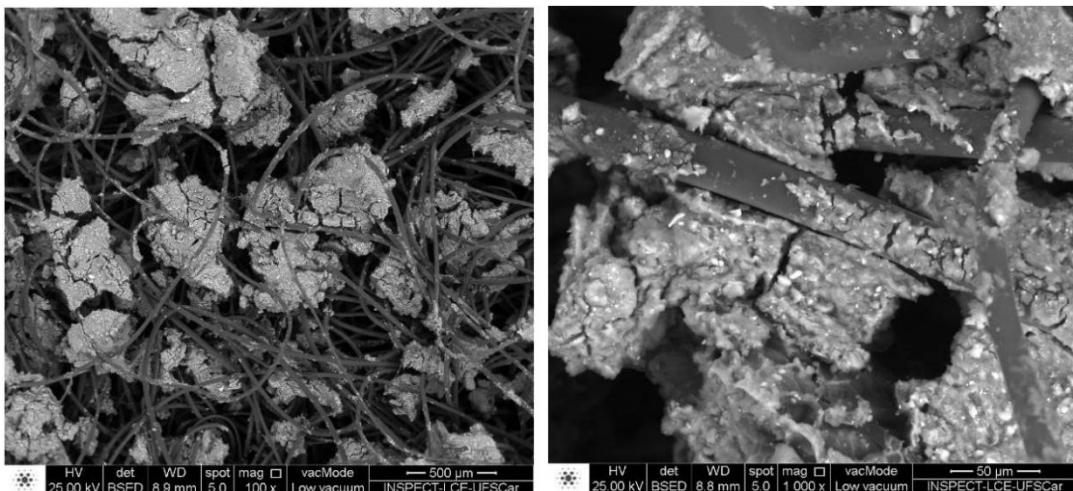
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.33 - Micrografias do geotêxtil usado de 600g.m⁻², imagens com aumento de 100x e 1000x



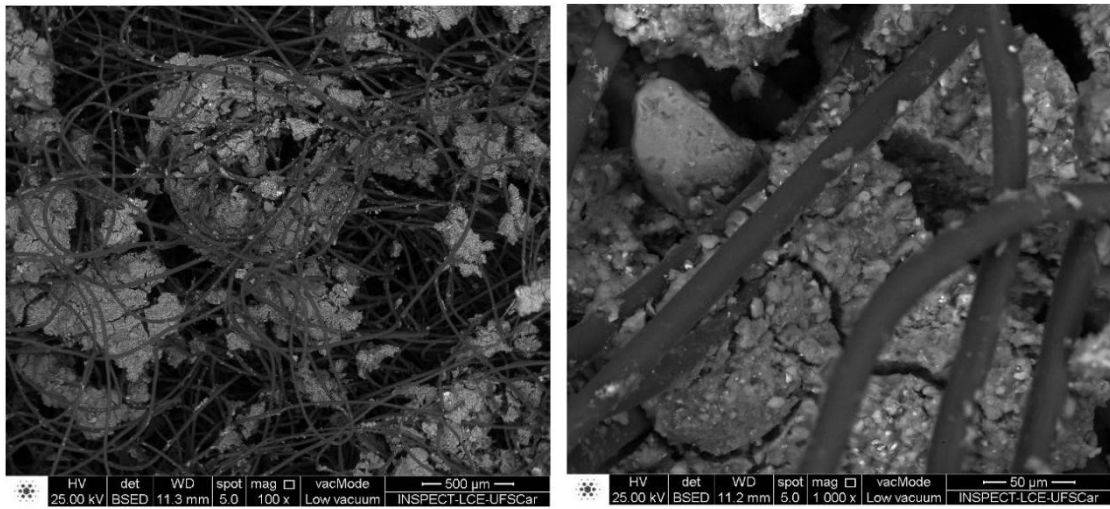
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.34 - Micrografias do geotêxtil usado de 500g.m⁻², imagens com aumento de 100x e 1000x



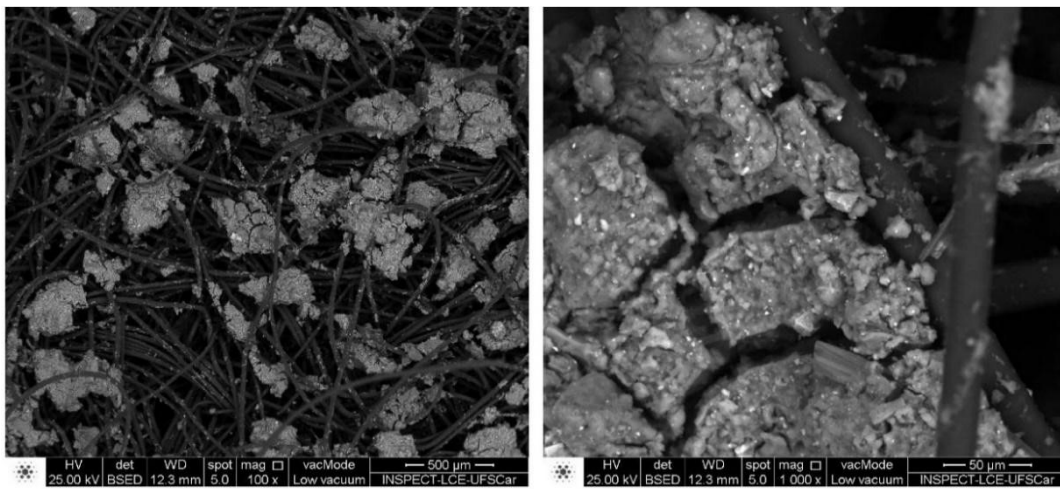
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.35 - Micrografias do geotêxtil usado de 400g.m⁻², imagens com aumento de 1 00x e 1000x



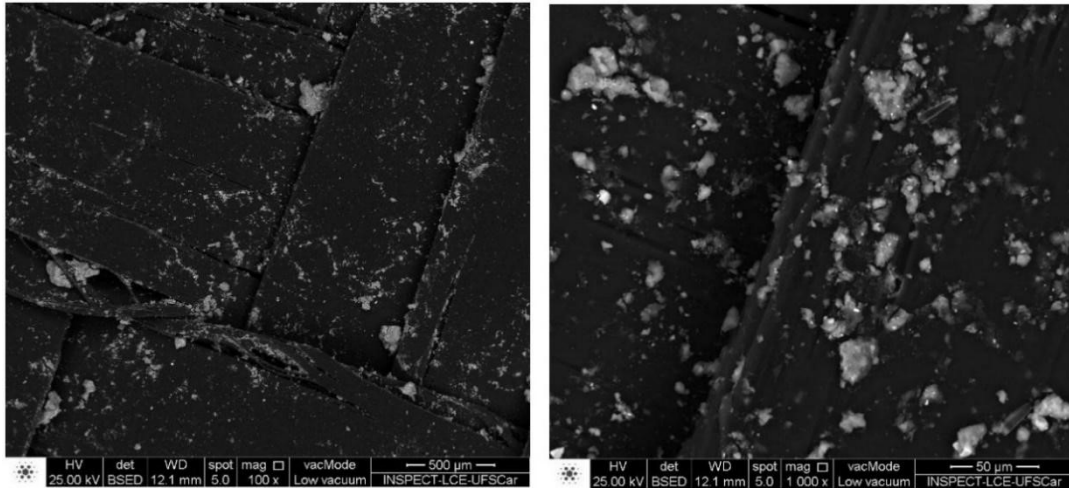
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.36 - Micrografias do geotêxtil usado de 300g.m⁻², imagens com aumento de 100x e 1000x



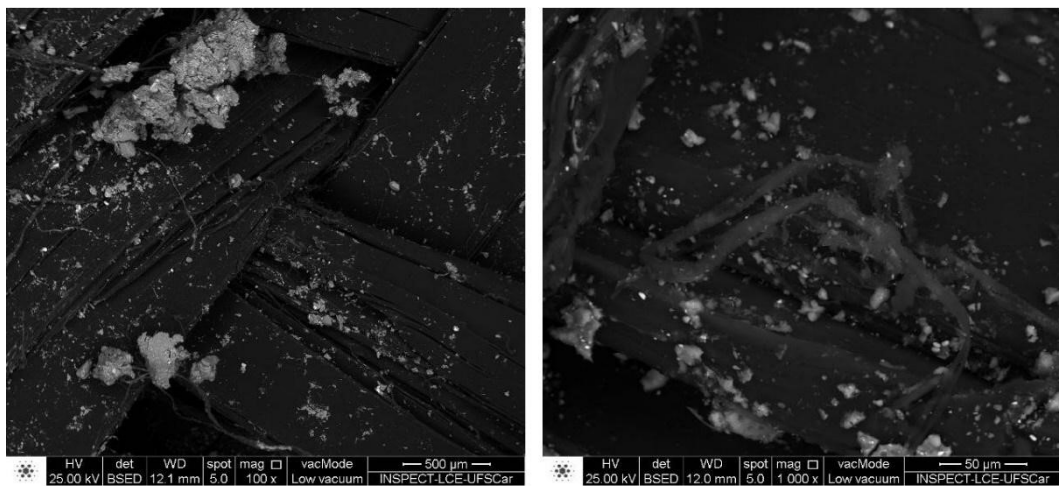
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.37 - Micrografias do geotêxtil usado de 55/55UV, imagens com aumento de 100x e 1000x



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.38 - Micrografias do geotêxtil usado de 105/105DW, imagens com aumento de 100x e 1000x



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

5.6.5 Análises em amostras de lodo bruto por Difração de Raios X

Para análise mineralógica qualitativa das amostras dos lodos da primeira e segunda campanha de coleta, e verificação de possíveis diferenças entre os lodos,

foram realizados ensaios de Difração de Raios X, cabe notar que a análise de DRX somente analisa a parte cristalina das amostras.

Na Tabela 5.17 são apresentados os resultados de identificação mineralógica qualitativa dos elementos químicos presentes nas amostras de lodos brutos obtidos pela análise de difração de raios X.

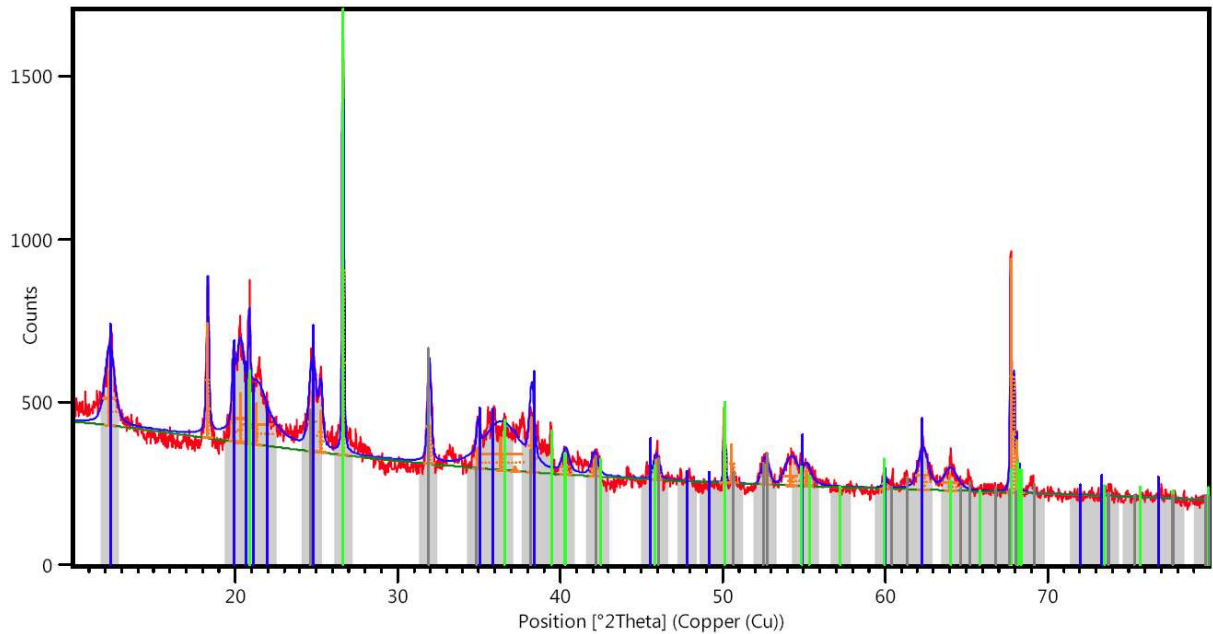
Tabela 5.17 - Identificação qualitativa dos componentes químicos encontrado nos lodos da 1° e 2° campanha de coleta de lodo

Nome do Composto	Fórmula	campanha de coleta de lodo	
		Primeira	Segunda
Silicato de alumínio hidratado - Caulinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	x	x
Quartzo	SiO_2	x	
Carbonato de ferro	$Fe(CO_3)$	x	
Hidróxido de alumínio - Gibsita	$Al(OH)_3$		x
Siderita	$FeCO_3$		x
Hidróxido de Ferro (III)	$FeHO_2$		x

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

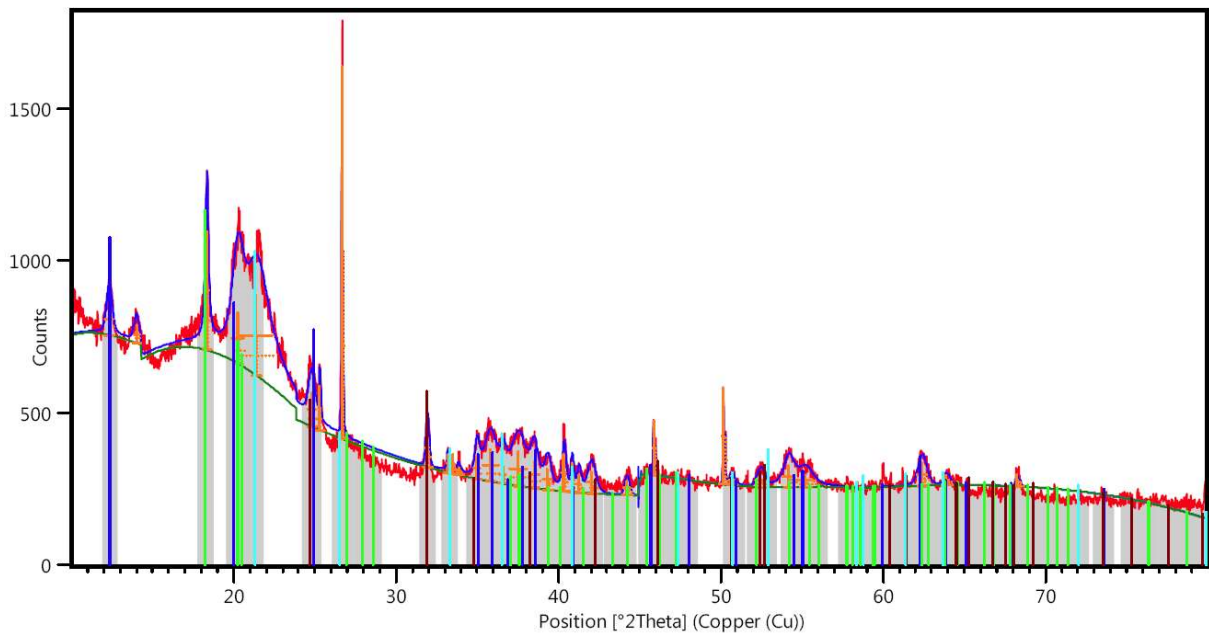
As Figuras 5.39 e 5.40 mostram picos de difração de baixa intensidade para as duas amostras analisadas. Contudo, os picos são característicos das fases cristalinas referentes aos argilominerais encontrados. Comparando os resultados aos observados por Barroso (2007) em lodos desaguados de sulfato de alumínio, verifica-se que os compostos Siderita e Hidróxido de Ferro III não foram observados em sua pesquisa. Comparando os argilominerais identificados nos lodos desta pesquisa, constata-se que o composto Caulinita foi o único presente nas duas campanhas de coleta de lodo, evidenciando que existem diferenças entre os lodos das duas campanhas em relação a componentes químicos e estrutura cristalina.

Figura 5.39 - Resultado da identificação de fases da amostra do lodo da 1ª campanha de coleta por DRX



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Figura 5.40 - Resultado da identificação de fases da amostra do lodo da 2ª campanha de coleta por DRX



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

5.6.6 Distribuição de tamanho de partículas nas amostras dos lodos brutos em análise por SEDIGRAPH

A Figura 5.41 e a Tabela 5.18 apresentam os resultados da determinação de distribuição de tamanho das partículas por atenuação de Raios X (SEDIGRAPH), para os lodos brutos da primeira e segunda campanha de coleta.

Figura 5.41 - Curva de distribuição de tamanhos das partículas em massa acumulada por diâmetro de esfera equivalente para os lodos brutos da 1° e 2° campanha de coleta

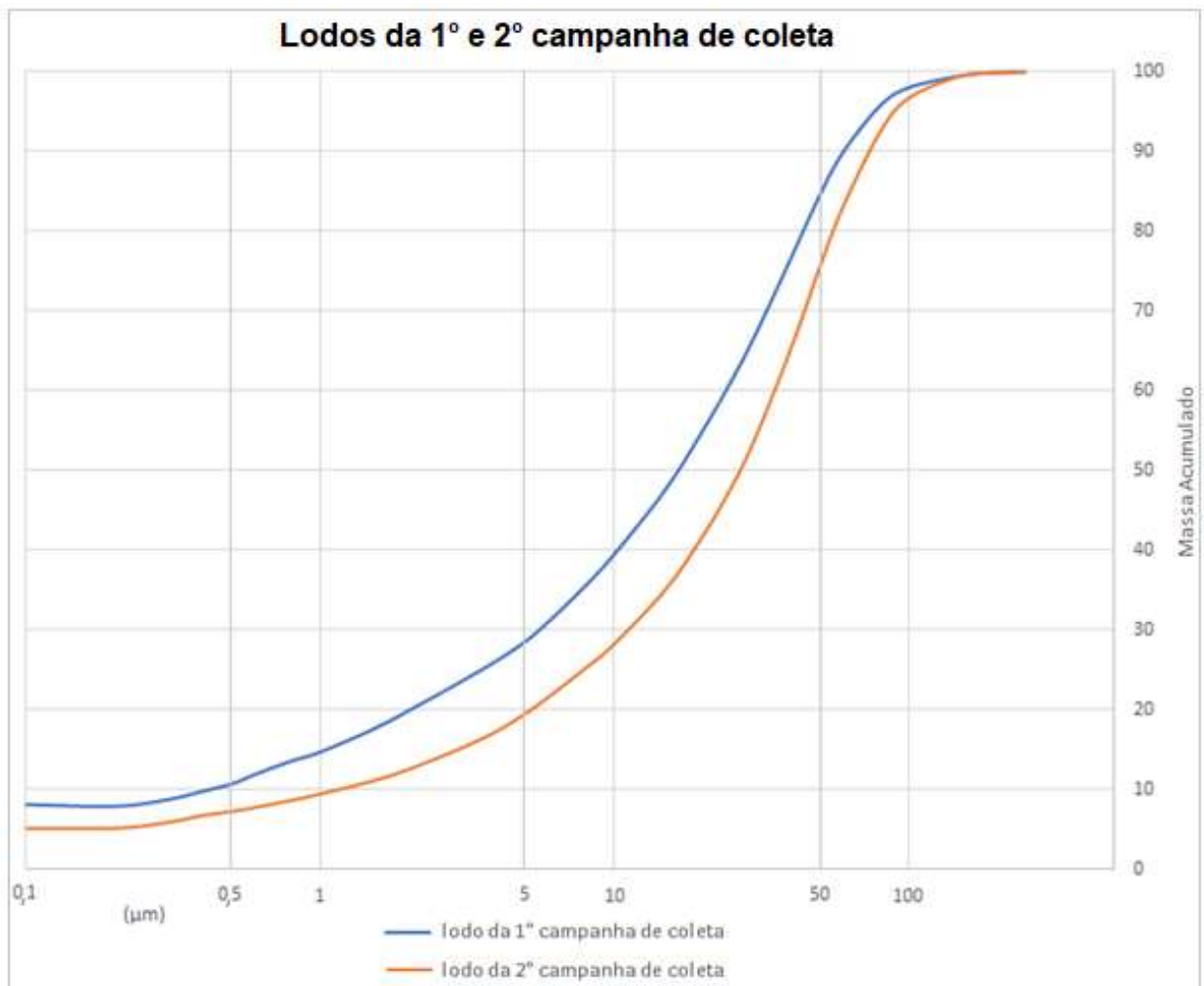


Tabela 5.18 - Distribuição de tamanhos das partículas em massa acumulada por diâmetro de esfera equivalente para os lodos brutos da 1° e 2° campanha de coleta

Diâmetro equivalente Máximo (µm)	Diâmetro equivalente Mínimo (µm)	Diâmetro equivalente Médio (µm)	Massa Acumulada 1° campanha de coleta (%)	Massa Acumulada 2° campanha de coleta (%)
300,00	250,00	273,90	100,00	100,00
250,00	200,00	223,60	99,90	99,90
200,00	150,00	173,20	99,50	99,50
150,00	100,00	122,50	98,00	96,70
100,00	80,00	89,44	95,70	92,40
80,00	60,00	69,28	89,90	83,10
60,00	50,00	54,77	84,50	75,50
50,00	40,00	44,72	76,70	65,40
40,00	30,00	34,64	66,80	53,90
30,00	25,00	27,39	61,20	47,90
25,00	20,00	22,36	55,00	41,80
20,00	15,00	17,32	47,70	35,20
15,00	10,00	12,25	39,50	28,30
10,00	8,00	8,94	35,60	25,30
8,00	6,00	6,93	31,10	21,70
6,00	5,00	5,48	28,60	19,60
5,00	4,00	4,47	26,20	17,40
4,00	3,00	3,46	23,50	15,20
3,00	2,00	2,45	19,90	12,60
2,00	1,50	1,73	17,50	11,10
1,50	1,00	1,23	14,70	9,50
1,00	0,80	0,89	13,60	8,70
0,80	0,60	0,69	11,90	7,80
0,60	0,50	0,55	10,70	7,30
0,50	0,40	0,45	9,80	6,80

0,40	0,30	0,35	8,70	5,90
0,30	0,20	0,25	7,90	5,20
0,20	0,10	0,14	8,10	5,20

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Pode-se verificar que o lodo da primeira campanha de coleta apresenta maiores porcentagens de partículas com tamanhos menores, com massa acumulada de 17,5% para partículas com diâmetro inferior 2 μm , contra 11,1% para os lodos da segunda campanha de coleta. Embora a diferença de massa acumulada para as partículas inferiores a 2 μm seja de apenas 6,4% entre os lodos, o lodo da 1° campanha apresenta uma massa acumulada 60% maior para partículas finas quando comparados com o lodo da 2° campanha. Cabe salientar que o ensaio determina a distribuição de massa e não o número de partículas em cada faixa de tamanho, e em termos qualitativos, essa diferença pode ter impactado nos resultados das drenagens no que se refere ao término do fluxo de água livre e em relação à porcentagem drenada com cor aparente inferior a 75uH.

Ao observar o histograma 29 do Apêndice II, que apresenta o tempo para o término das drenagens, verifica-se que os leitos com lodos da 1° campanha de coleta, que apresentam mais finos, extinguiram a água livre em média um dia mais tarde em relação aos leitos com lodos da 2° campanha de coleta, o que pode ser um indício de como as partículas menores de 2 μm podem influenciar na colmatação do geotêxtil. Além disso, a porcentagem drenada com cor aparente inferior a 75uH foi em média 4% inferior para os leitos com lodo da 1° campanha de coleta, sendo que o parâmetro cor aparente é influenciado pela quantidade de partículas com diâmetro inferiores a 2 μm , o que corrobora com os resultados observados de distribuição granulométrica.

Cordeiro (2001) apresentou a distribuição de tamanho de partículas de resíduos de ETAs de três cidades e observou que entre 45% e 70% das partículas são menores que 10 μm , observação que não se verifica para o lodo da 2° campanha de coleta utilizado nessa pesquisa. Morita *et al.* (2002) utilizando

analisador de partículas, verificaram que de 60% a 68% das partículas de seu lodo de ETA estudado apresentaram diâmetro compreendido entre 2 e 20 μm , o que não pode ser observado para os lodos deste estudo. Nesta pesquisa os resultados demonstraram que 17,5 e 11,1% das partículas são menores que 10 μm ; e 47,7 e 35,2% estão entre 2 e 20 μm , considerando a 1^o e 2^a campanha de coleta, respectivamente, conforme Tabela 5.18.

6 CONCLUSÕES

A partir do acompanhamento, observação e análise dos ensaios realizados, pode-se concluir que um dos mais importantes mecanismos envolvidos no processo de drenagem é a estabilização do pré-filtro (torta), formado pela sedimentação dos sólidos presentes no lodo sobre o geotêxtil e que tem ação preponderante no processo de drenagem. As evidências desta importância estão listadas a seguir:

- aparecimento do pré-filtro formado pelos sólidos do lodo sedimentados como fator determinante para a diminuição da taxa de vazão, com melhora da qualidade do líquido drenado;
- ensaios realizados com lodos com o mesmo teor de sólidos iniciais, os leitos com maiores alturas de lodo, conseqüentemente, com maiores TAS, apresentaram maiores taxas de vazão no início dos ensaios, porém após a estabilização do pré-filtro esta tendência se inverteu, fazendo com que os leitos com alturas menores de lodo aplicado obtivessem maiores taxas de vazão;
- mesmo havendo diferenças entre os parâmetros hidráulicos dos geotêxtis utilizados (permissividade e permeabilidade normal), não se constatou diferenças significativas entre as taxas de vazão para leitos com diferentes geotêxteis, considerando a mesma altura da camada de lodo ou TAS.

Ainda em relação ao pré-filtro, vale destacar que, a grande maioria dos líquidos drenados nos primeiros minutos de drenagem, antes da formação da torta, não possuíam qualidade compatível com nenhum dos enquadramentos estabelecidos nesta pesquisa em relação aos parâmetros de cor e turbidez. Sendo assim, notou-se a possibilidade de retorno desta parcela de líquido drenado ao leito, após a formação da camada do pré-filtro, e que poderia aumentar a porcentagem do líquido drenado com melhor qualidade. Porém, não foi adotado este procedimento de retorno nesta pesquisa, que fica como sugestão para estudos futuros.

Considerando os ensaios realizados e a influência das diferentes condições iniciais neste processo, ou seja, dos múltiplos fatores envolvidos na eficiência da drenagem de lodo de ETA em LD, pode-se concluir que:

- o teor de sólidos totais iniciais do lodo bruto tem forte relação inversamente proporcional a porcentagem de líquido drenado em relação ao volume de lodo aplicado, sendo os leitos com maiores %ST apresentaram menores porcentagens de drenado final;
- o tempo de término das drenagens não teve correlação significativa com o tipo de geotêxtil utilizado;
- o geotêxtil 105/105DW apresentou drenados com qualidade significativamente inferiores aos demais quanto ao parâmetro de turbidez;
- a Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) foi o parâmetro com maior influência na duração e término das drenagens;
- a altura de camada de lodo foi o parâmetro com maior influência quando se avalia a porcentagem dos drenados com melhor qualidade, sendo que os leitos com maiores alturas apresentaram porcentagens maiores de líquido drenado com boa qualidade. Tal conclusão está relacionada com o fato de que a porcentagem de líquido drenado com baixa qualidade, antes da estabilização do pré-filtro formado pelos sólidos do lodo sedimentados ser menor em relação ao volume drenado total, para os leitos com maiores alturas de lodo;
- os leitos que não apresentaram nenhum drenado com boa qualidade estão associados a menores alturas de aplicação de lodo e baixos %ST, e pode-se verificar que estes ensaios terminaram suas vazões antes que os drenados apresentassem melhora, o que indica a ineficiência de drenagens com TAS abaixo de 1 kg.m^{-2} .

De forma geral, os parâmetros teor de sólidos do lodo (%ST), altura de camada de lodo e TAS são diretamente proporcionais a porcentagem de drenado com melhor qualidade e inversamente proporcionais ao tempo para estabelecer-se o fim da etapa

de drenagem, com a ausência de água livre sobrenadante no leito. Para a faixa de valores estudados nessa pesquisa, verificou-se que TAS de 10 kg.m⁻² promove drenagens com durações superiores a 7 dias, o que precisa ser considerado no dimensionamento e aplicação de LD quando da adoção de valores iguais ou superiores a esta taxa.

Analisando os resultados dos ensaios de caracterização dos geotêxteis utilizados na pesquisa e sua influência no processo de desaguamento, conclui-se que:

- a capacidade de retenção de certos diâmetros de partícula para os geotêxteis não tecidos (NT) está mais relacionada com a espessura destes geotêxteis do que com as dimensões das aberturas em suas superfícies, considerando análise combinada entre os valores de abertura de filtração e espessura, com as micrografias dos geotêxtis NT;
- a abertura de filtração está relacionada à performance inferior do geotêxtil Tecido 105/105DW em promover drenados com valores baixos de turbidez, fato que foi corroborado pela análise das micrografias, em que o geotêxtil 105/105DW apresentou maior dimensão de abertura de filtração em relação ao outro geotêxtil tecido utilizado nesta pesquisa;

A partir dos resultados dos ensaios de caracterização das amostras de lodo e sua influência no processo de desaguamento pode-se concluir que:

- os ensaios realizados com lodos da 1° e 2° campanha de coleta apresentaram diferenças nos resultados, principalmente em relação ao tempo de término das drenagens e porcentagem de drenado com cor aparente inferior a 75 uH, com lodos da primeira campanha de coleta apresentando maiores tempos para o término da drenagem da água livre e menores porcentagens de drenado com cor aparente inferior a 75uH;
- as diferenças de distribuição granulométrica e de composição química entre os lodos da 1° e 2° campanha de coleta de amostras podem ter contribuído

para que houvesse diferenças entre as taxas de vazão e cor aparente dos líquidos drenados para os ensaios realizados em duplicata;

- as amostras de lodo com maior porcentagem de partículas menores resultaram em menores taxas de vazão e líquidos drenados com melhor qualidade.

Em relação à qualidade da água livre decantada sobre os leitos, após 48 horas, conclui-se que os valores de cor aparente e turbidez foram compatíveis com a qualidade do líquido drenado em cada ensaio. Estes resultados podem viabilizar a implementação de mecanismos que possibilitem a retirada da água decantada sobre o leito, diminuindo o tempo total de drenagem para leitos com alta TAS.

Com relação às regressões, de maneira geral, verificou-se que a abordagem adotada não foi suficiente para modelar totalmente o fenômeno estudado, que se mostrou pouco determinístico. A constatação de que diferenças entre de distribuição granulométrica e qualitativas entre as partículas dos lodos da 1° e 2° campanha de coleta podem ter influenciado no resultado das drenagens, indica a necessidade de um estudo mais detalhado sobre a interferência de outros fatores no desaguamento de lodo de ETA por LD, fatores que vão além das variações dos parâmetros de entrada propostos na modelagem.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados e condução desta pesquisa, com a realização de muitos ensaios de desaguamento de lodo em LD, tem-se a seguir algumas sugestões para pesquisas e trabalhos futuros:

- Influência do fenômeno da transmissividade no desaguamento de lodo de ETA em LD além do fluxo normal ao plano do geotêxtil;
- Influência dos múltiplos fatores na fase de secagem de lodo em LD, após a fase de drenagem, visto que pesquisas sobre o tema apresentaram lodos retidos no leito com teores de sólidos totais superiores a 60% após 7 dias de secagem, porém poucos estudos relacionam as variáveis, como por exemplo a TAS, com o tempo de secagem do lodo;
- Avaliar o efeito da recirculação do líquido decantado (sobrenadante) na fase de desaguamento de lodo em LD;
- 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.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHON, C. L. **Simpósio sobre Resíduos Sólidos: Avanços e desafios da reciclagem no Brasil**. 7ª ed. Escola de Engenharia de São Carlos. 2017.

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. & CORDEIRO, J.S. Gerenciamento de lodo de ETAs – Remoção de água livre através de Leitões de Secagem e Lagoas. *In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais*. Joinville – SC, ABES, cd, I-047, 2003.

ACHON, C.L.; BARROSO, M. M; CORDEIRO, J.S. Leito de Drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água. **Revista Engenharia Sanitária e ambiental**. ABES, Rio de Janeiro. Vol. 13 – Nº 1 – jan/mar 2008, 54-62p. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522008000100008>.

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, I-Achon-Brasil-1, 2004.

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.

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.

ALQAM, M.; JAMRAH, A. DAGHLAS, H. **Utilization of cement incorporated with water treatment sludge**. *Jordan Journal of Civil Engineering*, v. 5, p. 268-77, 2011.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater**. 20.ed. Washington DC, USA, 2001.

ARDILA, M.A.A. **Avaliação de sistemas fechados em geotêxteis não tecidos para o desaguamento de lodo de ETA por meio de ensaios de semi-desempenho**. 166p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2020.

AUGUSTO, L. G. S.; GURGEL, I. G. D.; CÂMARA NETO, H. F.; MELO, C. H.; COSTA A. M. O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 17, p. 1511-1522, 2012.

BARROSO, M.M. **Influência das micro e macro propriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leito de drenagem**. 249p.

Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

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.

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/35Assemae033.pdf>>. Acesso em: 29 mai. 2014.

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. 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. Portaria de Consolidação Nº 5 de 28 de Setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. **Ministério da Saúde**, 2017.

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 condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Ministério do Meio Ambiente**, Brasil, 2011.

BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto - 2014**. Brasília: SNIS, 2019.

CAMPOS, M. C. D. **Influência da recirculação de água de lavagem de filtros na qualidade da água tratada para consumo humano**. 148 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2014. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/257942>>. Acesso em: 24 ago. 2018.

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. Remoção Natural de Água de Lodos de ETAs Utilizando Leitos de Secagem e Lagoas de Lodo. *In: REALI, M.A.P et al. Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, 1999.

_____. 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 e ACHON, C.L. Challenges in WTP sludge management in Brazil. *In: XI Simpósio ítalo-brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SIDISA 2012, Milão-Itália, Anais*. APESB, cód. 835, 2012, 4p.

CORDEIRO, J.S., REIS, R. F.; ACHON, C.L.; BARROSO, M. M. (2014). Evolução dos Leitos 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. Water treatment plant waste management. Denver. Environmental Engineering & Technology, Inc., **AWWA Research Foundation**, 1987.

CORNWELL, D. A.; MUTTER, R. N.; VANDERMEYDEN, C. **Commercial Application and Marketing of Water Plant Residuals**. Denver: American Water Works Association, 2000.

COSTA, A.J.C. **Análise de viabilidade da utilização de lodo de ETA coagulado com cloreto de polialumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas: estudo de caso na ETA do município de Mirassol-SP**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

COSTA, C. M. L.; LODI, P. C.; COSTA, Y. D. J.; BUENO, B. S. Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos. *In: Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 18, n. 2, p. 158-169, 2008.

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., 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; SABOGAL, L. P. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**. São Carlos: Volume I Editora LDiBe, São Carlos - SP, 2008. 1560 p.

DIAS, L. M.; BATOLIONE, G.; MORAIS, F. U.; FERNANDES SOBRINHO, J.; RIBEIRO, M. C.; LISBOA, M. S. Alternativa de Destinação Final do Lodo de Estação

de Tratamento de Água - Fabricação de Blocos Cerâmicos. *In: XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2002, Cancun*. XXVIII Congreso. Mexico: AIDIS, 2002.

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.

FERREIRA, B.O.; VIANNA, M. R. Eficiência do desaguamento de lodos de decantadores e água de lavagem de filtros de estação de tratamento de água através de filtros geotêxteis: estudo de caso. **27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais**. Goiânia, 2013.

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.

FREITAS, R. A. S. **Comportamento de geotêxteis como filtro em resíduos – fosfógeno e lama vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003, 131p.

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.

GONÇALVES, F.; SOUZA, C.H.U.; TAHIRA, F.S.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R.S. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Revista DAE**, v. 65, n. 205, p.5-14, 2017.

GUIMARÃES, M. G. A., URASHIMA, D. C. & VIDAL, D. M. Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems. **Geosynthetics International**, v. 21, n. 5, p. 310-320, 2014.

HELLER, L.; PÁDUA, V.L. **Abastecimento de água para consumo humano**. Volumes 1 e 2 – 2ª edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

KENDALL, M. G. A new measure of rank correlation. **Biometrika**, v.30, p. 81-93, 1938.

KURODA, E.K.; DA SILVA, S.M.C.P.; FERNANDES, F., OLIVEIRA, N.S., AISSE, M.M. Desaguamento de lodo de ETA em leitos de secagem cobertos, convencionais e modificados. *In: CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C.V. (Coord.) Lodo de estações de tratamento de água: Gestão e Perspectivas Tecnológicas*. Sanepar, 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.

LIAO, K.; BHATIA, S. Evaluation on filtration performance of woven geotextiles by falling head, pressure filtration test, and hanging bag tests. *In: International conference on geosynthetics*, 8., 2006, Yokohama. Proceedings Rotterdam: Millpress, 2006.

LIRA, O.O. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**. Brasília: FUNASA, 2014. 112 p.

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.

MATTSSON, A. Sludge Management Situation in Sweden- a brief overview. *In: 1st International IWA Conference on Holistic Sludge Management. IWA specialist conference*, 6-8 May 2013, Västerås, Sweden. Disponível em <<http://www.hsm2013.se/about-the-event/topics-programme/keynote-presentations>>, acesso em 20 ago. 2013.

MIKI, M. K. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas**. Dissertação (Mestrado). Escola politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica. São Paulo, 1998.

MONTALVAN, E. L. T. **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da Estação de Tratamento de Água Cubatão**. 133 f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MONTGOMERY, D. C., Peck, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. New York: Wiley, 1992.

MOODLEY M. **Effects of the Land Disposal of Water Treatment Sludge on Soil Physical Quality**. Ph.D. Thesis. University of Natal, Pietermaritzburg, South Africa. 2001.

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 ago. 2013.

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.

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.

OLIVEIRA, N.S. **Estudo da secagem de lodo de estação de tratamento de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

PALMEIRA, E.M (2018). **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. Editora Oficina de Textos, São Paulo - SP, 2018. 265 p.

PESSOA, J. H. Gestão dos Efluentes da ETA. *In: 1º Simpósio: Experiências em gestão de Recursos Hídricos por Bacia Hidrográfica*. São Pedro, SP, 2007.

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/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101734>. Acesso em 22 ago. 2020.

PNSB (2008). **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/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008 .pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf)>. Acesso em: ago. 2013.

PROSAB 2. **Noções gerais de Tratamento e disposição final de lodos de Estações de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro – RJ, 2001.

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. Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. *In: REALI, M.A.P (Coord.)*. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 1999. 250p.

REIS, E. L.T.; CONTRIM, M. E .B .Avaliação do impacto ambiental de estações de tratamento de águas em cursos d'água. *In: Environmental and Health World Congress*, 2006, Santos.

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.

ROYSTON, Patrick. An extension of Shapiro and Wilk's W test for normality to large samples. **Applied Statistics**, v. 31, p. 115- 124, 1982.

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, 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.; 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 secagem. **Ciência & Engenharia**, v. 23, n. 1, p. 65 -71, 2014.

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.

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 ; 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.

TISUTIYA, M. T. Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. 1º edição – São Paulo: **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES**, 2001. 185p.

TITSHALL L.W.; HUGHES J.C. Characterization of some South African Water treatment residues and implications for land application. **Water Sa**, v. 31, n. 3, p. 299-307, 2005.

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.

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.

9 APÊNDICE

9.1 APÊNDICE I - Tabelas

Tabela 9.1 - Porcentagem dos drenados com cor aparente inferior a 75 uH para os 335 desaguamentos realizados

Porcentagens dos drenados com cor aparente menor de 75uH							
%ST	Geotêxtil	Campanha de coleta de lodo	Altura da camada de lodo aplicada				
			H=10	h=20	H=30	H=40	H=50
0,5	600 g.m ⁻¹	1	85	90	90	91	92
0,5	500 g.m ⁻¹	1	66	83	85	90	90
0,5	400 g.m ⁻¹	1	48	84	85	90	92
0,5	300 g.m ⁻¹	1	73	75	89	88	91
0,5	55/55 UV	1	0	88	91	92	93
0,5	105/105 DW	1	76	84	61	78	65
1	600 g.m ⁻¹	1	28	63	70	85	90
1	500 g.m ⁻¹	1	71	79	87	87	85
1	400 g.m ⁻¹	1	24	61	74	67	77
1	300 g.m ⁻¹	1	0	0	81	85	91
1	55/55 UV	1	77	87	90	92	92
1	105/105 DW	1	69	82	87	88	88
1,5	600 g.m ⁻¹	1	18	84	82	79	85
1,5	500 g.m ⁻¹	1	55	82	83	86	89
1,5	400 g.m ⁻¹	1	55	76	84	84	88
1,5	300 g.m ⁻¹	1	70	79	82	86	88
1,5	55/55 UV	1	78	85	88	90	92
1,5	105/105 DW	1	55	71	85	84	86
2	600 g.m ⁻¹	1	60	78	83	86	89
2	500 g.m ⁻¹	1	68	83	97	90	92
2	400 g.m ⁻¹	1	70	82	87	89	91
2	300 g.m ⁻¹	1	71	84	86	89	90

2	55/55 UV	1	76	85	86	89	89
2	105/105 DW	1	65	85	51	78	82
2,5	600 g.m ⁻¹	1	79	87	90	92	94
2,5	500 g.m ⁻¹	1	77	83	87	93	96
2,5	400 g.m ⁻¹	1	84	84	91	93	97
2,5	300 g.m ⁻¹	1	82	90	91	93	96
2,5	55/55 UV	1	79	92	89	94	96
2,5	105/105 DW	1	66	84	85	88	90
3	600 g.m ⁻¹	1	66	81	86	88	87
3	500 g.m ⁻¹	1	73	80	86	88	87
3	400 g.m ⁻¹	1	81	91	92	94	95
3	300 g.m ⁻¹	1	86	87	92	93	94
3	55/55 UV	1	65	84	85	92	87
3	105/105 DW	1	85	81		90	88
0,5	600 g.m ⁻¹	2	86	94	95	90	97
0,5	500 g.m ⁻¹	2	83	91	97	87	89
0,5	400 g.m ⁻¹	2	86	91	94	89	96
0,5	300 g.m ⁻¹	2	55	90	92	94	95
0,5	55/55 UV	2	67	82	97	96	82
0,5	105/105 DW	2	0	63	44	67	66
1	600 g.m ⁻¹	2	0	64	69	87	81
1	500 g.m ⁻¹	2	73	83	87	90	92
1	400 g.m ⁻¹	2	89	93	88	91	92
1	300 g.m ⁻¹	2	69	83	88	89	96
1	55/55 UV	2	82	87	90	92	93
1	105/105 DW	2	76	72	65	85	82
1,5	600 g.m ⁻¹	2	0	78	84	88	97
1,5	500 g.m ⁻¹	2	74	85	88	92	92
1,5	400 g.m ⁻¹	2	63	86	84	84	91
1,5	300 g.m ⁻¹	2	80	88	96	92	92

1,5	55/55 UV	2	84	89	92	93	94
1,5	105/105 DW	2	78	83	84	87	84
2	600 g.m ⁻¹	2	79	88	91	92	91
2	500 g.m ⁻¹	2	81	86	90	93	94
2	400 g.m ⁻¹	2	77	81	85	89	88
2	300 g.m ⁻¹	2	81	88	89	93	94
2	55/55 UV	2	89	92	93	94	99
2	105/105 DW	2	82	82	78	85	77
2,5	600 g.m ⁻¹	2	82	90	92	94	95
2,5	500 g.m ⁻¹	2	82	83	91	93	94
2,5	400 g.m ⁻¹	2	82	82	86	90	89
2,5	300 g.m ⁻¹	2	82	90	91	94	94
2,5	55/55 UV	2	90	87	82	91	96
2,5	105/105 DW	2	75	79	78	89	85
3	400 g.m ⁻¹	2	85	90	90	91	92

Tabela 9.2 - Porcentagem dos drenados com Turbidez inferior a 40uT, 100uT e 10uT

Porcentagem dos drenados com Turbidez inferior a 40uH, 100uH e 10uH							
Campanha de coleta de lodo, %ST do lodo e Geotêxtil		Faixas de Turbidez	Altura da camada de lodo aplicada				
			H=1 0	H=2 0	H=3 0	H=4 0	H=5 0
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	92	97	96	96	92
%ST	0,5	Condição II (< 100 uT)	92	97	96	96	92
Geotêxtil	600 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	92	97	96	90	92
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	88	93	85	96	95
%ST	0,5	Condição II (< 100 uT)	88	93	85	96	95
Geotêxtil	500 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	66	83	85	90	90

Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	91	93	95	90	92
%ST	0,5	Condição II (< 100 uT)	91	93	95	90	96
Geotêxtil	400 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	71	84	89	90	92
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	89	92	95	96	96
%ST	0,5	Condição II (< 100 uT)	89	92	95	96	96
Geotêxtil	300 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	73	83	89	92	91
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	18	14	97	97	98
%ST	0,5	Condição II (< 100 uT)	49	25	97	97	98
Geotêxtil	55/55 UV	Condição III (< 10 uT)	0	9	97	97	93
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	76	84	61	82	68
%ST	0,5	Condição II (< 100 uT)	76	93	61	82	68
Geotêxtil	105/105 DW	Condição III (< 10 uT)	76	84	57	78	65
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	83	89	92	92	95
%ST	1	Condição II (< 100 uT)	83	89	92	92	95
Geotêxtil	600 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	72	65	78	86	93
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	87	85	91	93	94
%ST	1	Condição II (< 100 uT)	96	97	96	98	94
Geotêxtil	500 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	87	85	91	90	88
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	89	88	89	90	98
%ST	1	Condição II (< 100 uT)	89	88	96	90	98
Geotêxtil	400 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	24	73	81	81	83

Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	74	85	94	91	94
%ST	1	Condição II (< 100 uT)	86	92	94	91	94
Geotêxtil	300 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	74	85	89	91	91
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	87	92	94	95	95
%ST	1	Condição II (< 100 uT)	87	92	94	95	99
Geotêxtil	55/55 UV	Condição III (< 10 uT)	77	87	90	92	92
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	79	88	91	97	93
%ST	1	Condição II (< 100 uT)	91	95	91	97	93
Geotêxtil	105/105 DW	Condição III (< 10 uT)	79	88	87	90	90
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	96	90	91	92	100
%ST	1,5	Condição II (< 100 uT)	96	99	100	92	100
Geotêxtil	600 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	70	79	86	84	88
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	78	88	91	92	94
%ST	1,5	Condição II (< 100 uT)	78	95	96	92	98
Geotêxtil	500 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	67	88	91	89	91
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	77	88	92	91	98
%ST	1,5	Condição II (< 100 uT)	87	96	97	91	98
Geotêxtil	400 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	66	76	87	87	90
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	79	92	96	96	94
%ST	1,5	Condição II (< 100 uT)	91	92	96	96	94
Geotêxtil	300 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	79	79	91	88	91

Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	88	91	93	93	95
%ST	1,5	Condição II (< 100 uT)	88	91	93	93	95
Geotêxtil	55/55 UV	Condição III (< 10 uT)	78	85	88	90	95
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	78	84	89	91	91
%ST	1,5	Condição II (< 100 uT)	91	93	97	91	91
Geotêxtil	105/105 DW	Condição III (< 10 uT)	68	78	85	87	88
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	94	96	97	100	96
%ST	2	Condição II (< 100 uT)	94	96	97	100	96
Geotêxtil	600 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	82	89	87	90	91
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	91	96	97	93	95
%ST	2	Condição II (< 100 uT)	91	96	97	93	98
Geotêxtil	500 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	79	89	93	93	95
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	94	95	91	98	98
%ST	2	Condição II (< 100 uT)	94	95	97	98	98
Geotêxtil	400 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	42	77	83	86	89
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	79	89	91	93	94
%ST	2	Condição II (< 100 uT)	90	95	96	97	94
Geotêxtil	300 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	79	89	91	89	94
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	88	91	95	94	93
%ST	2	Condição II (< 100 uT)	88	91	95	94	93
Geotêxtil	55/55 UV	Condição III (< 10 uT)	76	85	90	94	89

Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	76	85	90	88	88
%ST	2	Condição II (< 100 uT)	76	85	90	91	88
Geotêxtil	105/105 DW	Condição III (< 10 uT)	65	85	88	85	88
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	87	92	94	99	99
%ST	2,5	Condição II (< 100 uT)	96	99	99	99	99
Geotêxtil	600 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	87	92	94	95	96
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	85	91	93	95	96
%ST	2,5	Condição II (< 100 uT)	85	91	93	95	98
Geotêxtil	500 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	85	87	90	95	96
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	84	90	98	96	99
%ST	2,5	Condição II (< 100 uT)	94	96	98	98	99
Geotêxtil	400 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	84	90	94	93	99
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	82	90	94	95	98
%ST	2,5	Condição II (< 100 uT)	92	90	94	97	98
Geotêxtil	300 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	82	90	94	95	96
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	94	96	96	99	98
%ST	2,5	Condição II (< 100 uT)	94	96	96	99	98
Geotêxtil	55/55 UV	Condição III (< 10 uT)	71	88	89	91	94
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	74	84	88	90	92
%ST	2,5	Condição II (< 100 uT)	74	88	88	90	92
Geotêxtil	105/105 DW	Condição III (< 10 uT)	66	80	85	88	90

Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	83	91	93	94	95
%ST	3	Condição II (< 100 uT)	83	97	93	98	98
Geotêxtil	600 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	74	85	86	91	92
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	83	90	94	98	95
%ST	3	Condição II (< 100 uT)	96	96	99	98	99
Geotêxtil	500 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	73	84	90	98	93
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	88	99	95	99	97
%ST	3	Condição II (< 100 uT)	88	99	99	99	97
Geotêxtil	400 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	81	91	92	94	95
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	86	91	95	96	96
%ST	3	Condição II (< 100 uT)	86	91	95	96	98
Geotêxtil	300 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	86	91	95	93	96
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	93	93	96	95	92
%ST	3	Condição II (< 100 uT)	93	93	96	95	92
Geotêxtil	55/55 UV	Condição III (< 10 uT)	77	88	92	92	89
Campanha de coleta de lodo	1	Condição I (< 40 uT)	85	85	-	93	91
%ST	3	Condição II (< 100 uT)	85	90	90	93	91
Geotêxtil	105/105 DW	Condição III (< 10 uT)	85	81	-	90	88
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	86	94	95	96	97
%ST	0,5	Condição II (< 100 uT)	86	94	95	96	97
Geotêxtil	600 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	86	94	95	96	97

Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	83	91	97	87	95
%ST	0,5	Condição II (< 100 uT)	83	91	97	93	95
Geotêxtil	500 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	83	91	97	87	89
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	86	91	94	96	96
%ST	0,5	Condição II (< 100 uT)	86	91	94	96	96
Geotêxtil	400 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	86	91	94	96	96
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	87	90	92	94	95
%ST	0,5	Condição II (< 100 uT)	87	90	92	94	95
Geotêxtil	300 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	55	75	92	94	95
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	93	95	97	96	82
%ST	0,5	Condição II (< 100 uT)	93	95	97	96	82
Geotêxtil	55/55 UV	Condição III (< 10 uT)	67	82	87	96	82
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	0	63	79	78	70
%ST	0,5	Condição II (< 100 uT)	0	63	79	78	70
Geotêxtil	105/105 DW	Condição III (< 10 uT)	0	63	44	73	66
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	91	94	96	97	97
%ST	1	Condição II (< 100 uT)	91	94	96	97	97
Geotêxtil	600 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	71	83	69	91	92
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	90	93	95	96	92
%ST	1	Condição II (< 100 uT)	90	93	95	96	97
Geotêxtil	500 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	73	83	87	90	92

Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	89	93	95	96	97
%ST	1	Condição II (< 100 uT)	89	93	95	96	97
Geotêxtil	400 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	89	82	88	91	97
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	89	93	97	95	96
%ST	1	Condição II (< 100 uT)	89	93	97	95	96
Geotêxtil	300 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	69	83	88	95	96
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	82	97	90	98	93
%ST	1	Condição II (< 100 uT)	98	97	97	98	98
Geotêxtil	55/55 UV	Condição III (< 10 uT)	82	87	90	92	93
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	76	72	85	89	85
%ST	1	Condição II (< 100 uT)	76	79	85	89	85
Geotêxtil	105/105 DW	Condição III (< 10 uT)	76	72	85	85	82
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	91	94	88	97	92
%ST	1,5	Condição II (< 100 uT)	91	94	95	97	92
Geotêxtil	600 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	74	85	88	92	92
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	91	94	88	97	92
%ST	1,5	Condição II (< 100 uT)	91	94	95	97	92
Geotêxtil	500 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	74	85	88	92	92
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	92	97	90	97	98
%ST	1,5	Condição II (< 100 uT)	92	97	96	97	98
Geotêxtil	400 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	76	86	90	92	94

Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	92	100	96	96	96
%ST	1,5	Condição II (< 100 uT)	92	100	96	96	96
Geotêxtil	300 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	80	88	89	92	96
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	84	89	92	93	94
%ST	1,5	Condição II (< 100 uT)	84	98	98	98	98
Geotêxtil	55/55 UV	Condição III (< 10 uT)	84	89	92	93	94
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	78	83	84	90	84
%ST	1,5	Condição II (< 100 uT)	78	83	89	90	86
Geotêxtil	105/105 DW	Condição III (< 10 uT)	78	83	84	87	84
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	92	96	97	97	98
%ST	2	Condição II (< 100 uT)	92	96	97	97	98
Geotêxtil	600 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	79	88	91	92	94
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	94	94	96	93	98
%ST	2	Condição II (< 100 uT)	94	94	96	98	98
Geotêxtil	500 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	81	86	90	93	94
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	92	95	96	92	98
%ST	2	Condição II (< 100 uT)	92	95	96	97	98
Geotêxtil	400 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	77	87	85	92	94
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	93	96	96	97	98
%ST	2	Condição II (< 100 uT)	93	96	96	97	98
Geotêxtil	300 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	81	88	89	93	94

Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	92	96	97	97	98
%ST	2	Condição II (< 100 uT)	92	96	97	97	98
Geotêxtil	55/55 UV	Condição III (< 10 uT)	79	88	91	92	94
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	82	88	82	85	81
%ST	2	Condição II (< 100 uT)	82	88	82	90	81
Geotêxtil	105/105 DW	Condição III (< 10 uT)	73	82	78	85	77
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	94	96	97	98	98
%ST	2,5	Condição II (< 100 uT)	94	96	97	98	98
Geotêxtil	600 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	82	90	92	98	95
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	93	88	97	93	97
%ST	2,5	Condição II (< 100 uT)	93	95	97	93	97
Geotêxtil	500 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	82	83	91	93	94
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	94	96	97	98	98
%ST	2,5	Condição II (< 100 uT)	94	96	97	98	98
Geotêxtil	400 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	82	88	91	94	94
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	93	90	97	98	97
%ST	2,5	Condição II (< 100 uT)	93	96	97	98	97
Geotêxtil	300 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	82	85	91	94	94
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	90	93	91	95	93
%ST	2,5	Condição II (< 100 uT)	90	93	91	95	93
Geotêxtil	55/55 UV	Condição III (< 10 uT)	81	87	82	91	93

Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	84	84	83	89	85
%ST	2,5	Condição II (< 100 uT)	84	84	83	92	88
Geotêxtil	105/105 DW	Condição III (< 10 uT)	75	79	78	89	85
Campanha de coleta de lodo	2	Condição I (< 40 uT)	96	97	98	98	98
%ST	3	Condição II (< 100 uT)	96	97	98	98	98
Geotêxtil	400 g.m ⁻¹	Condição III (< 10 uT)	85	90	94	94	95

Tabela 9.3 - Porcentagem do volume drenado final em relação ao volume de lodo aplicado

Porcentagem drenada final em relação ao volume total aplicado							
%ST	Geotêxtil	Campanha de coleta de lodo	Altura da camada de lodo aplicada				
			H=10	h=20	H=30	H=40	H=50
0,5	600 g.m ⁻¹	1	93%	91%	90%	90%	93%
0,5	500 g.m ⁻¹	1	96%	94%	95%	92%	90%
0,5	400 g.m ⁻¹	1	91%	93%	95%	93%	87%
0,5	300 g.m ⁻¹	1	91%	96%	92%	92%	91%
0,5	55/55 UV	1	97%	96%	95%	91%	91%
0,5	105/105 DW	1	92%	97%	94%	93%	95%
1	600 g.m ⁻¹	1	92%	92%	92%	93%	-
1	500 g.m ⁻¹	1	93%	89%	92%	94%	-
1	400 g.m ⁻¹	1	89%	91%	89%	-	-
1	300 g.m ⁻¹	1	89%	88%	92%	93%	-
1	55/55 UV	1	88%	90%	-	-	-
1	105/105 DW	1	88%	88%	-	-	-
1,5	600 g.m ⁻¹	1	91%	90%	85%	81%	-
1,5	500 g.m ⁻¹	1	87%	86%	86%	84%	-

1,5	400 g.m ⁻¹	1	84%	84%	86%	-	-
1,5	300 g.m ⁻¹	1	90%	90%	82%	81%	-
1,5	55/55 UV	1	87%	89%	81%	79%	-
1,5	105/105 DW	1	82%	81%	80%	81%	-
2	600 g.m ⁻¹	1	75%	80%	79%	69%	-
2	500 g.m ⁻¹	1	73%	75%	83%	78%	-
2	400 g.m ⁻¹	1	80%	77%	-	-	-
2	300 g.m ⁻¹	1	86%	84%	-	-	-
2	55/55 UV	1	71%	79%	-	-	-
2	105/105 DW	1	71%	79%	58%	52%	-
2,5	600 g.m ⁻¹	1	84%	74%	-	-	-
2,5	500 g.m ⁻¹	1	76%	-	-	-	-
2,5	400 g.m ⁻¹	1	79%	-	-	-	-
2,5	300 g.m ⁻¹	1	78%	67%	-	-	-
2,5	55/55 UV	1	69%	75%	-	-	-
2,5	105/105 DW	1	77%	78%	-	-	-
3	600 g.m ⁻¹	1	72%	73%	-	-	-
3	500 g.m ⁻¹	1	68%	74%	-	-	-
3	400 g.m ⁻¹	1	67%	-	-	-	-
3	300 g.m ⁻¹	1	59%	64%	-	-	-
3	55/55 UV	1	75%	75%	-	-	-
3	105/105 DW	1	84%	75%	-	-	-
0,5	600 g.m ⁻¹	2	94%	94%	94%	93%	94%
0,5	500 g.m ⁻¹	2	94%	92%	97%	95%	94%
0,5	400 g.m ⁻¹	2	94%	95%	94%	95%	93%
0,5	300 g.m ⁻¹	2	93%	95%	95%	95%	94%
0,5	55/55 UV	2	94%	95%	95%	95%	92%
0,5	105/105 DW	2	95%	95%	95%	96%	92%
1	600 g.m ⁻¹	2	89%	89%	88%	89%	-
1	500 g.m ⁻¹	2	89%	90%	92%	91%	-

1	400 g.m ⁻¹	2	91%	87%	91%	90%	90%
1	300 g.m ⁻¹	2	92%	91%	92%	92%	91%
1	55/55 UV	2	91%	89%	90%	91%	86%
1	105/105 DW	2	91%	91%	92%	93%	90%
1,5	600 g.m ⁻¹	2	85%	86%	88%	89%	-
1,5	500 g.m ⁻¹	2	88%	89%	89%	89%	87%
1,5	400 g.m ⁻¹	2	87%	87%	89%	87%	-
1,5	300 g.m ⁻¹	2	88%	87%	85%	90%	-
1,5	55/55 UV	2	88%	87%	89%	-	-
1,5	105/105 DW	2	88%	87%	90%	90%	-
2	600 g.m ⁻¹	2	84%	83%	86%	74%	-
2	500 g.m ⁻¹	2	82%	82%	84%	-	-
2	400 g.m ⁻¹	2	83%	83%	87%	-	-
2	300 g.m ⁻¹	2	85%	84%	86%	84%	-
2	55/55 UV	2	83%	84%	84%	-	-
2	105/105 DW	2	87%	85%	87%	-	-
2,5	600 g.m ⁻¹	2	80%	81%	79%	-	-
2,5	500 g.m ⁻¹	2	80%	81%	80%	-	-
2,5	400 g.m ⁻¹	2	80%	79%	84%	-	-
2,5	300 g.m ⁻¹	2	81%	81%	80%	-	-
2,5	55/55 UV	2	78%	79%	76%	-	-
2,5	105/105 DW	2	79%	82%	84%	80%	-
3	400 g.m ⁻¹	2	67%	60%	-	-	-

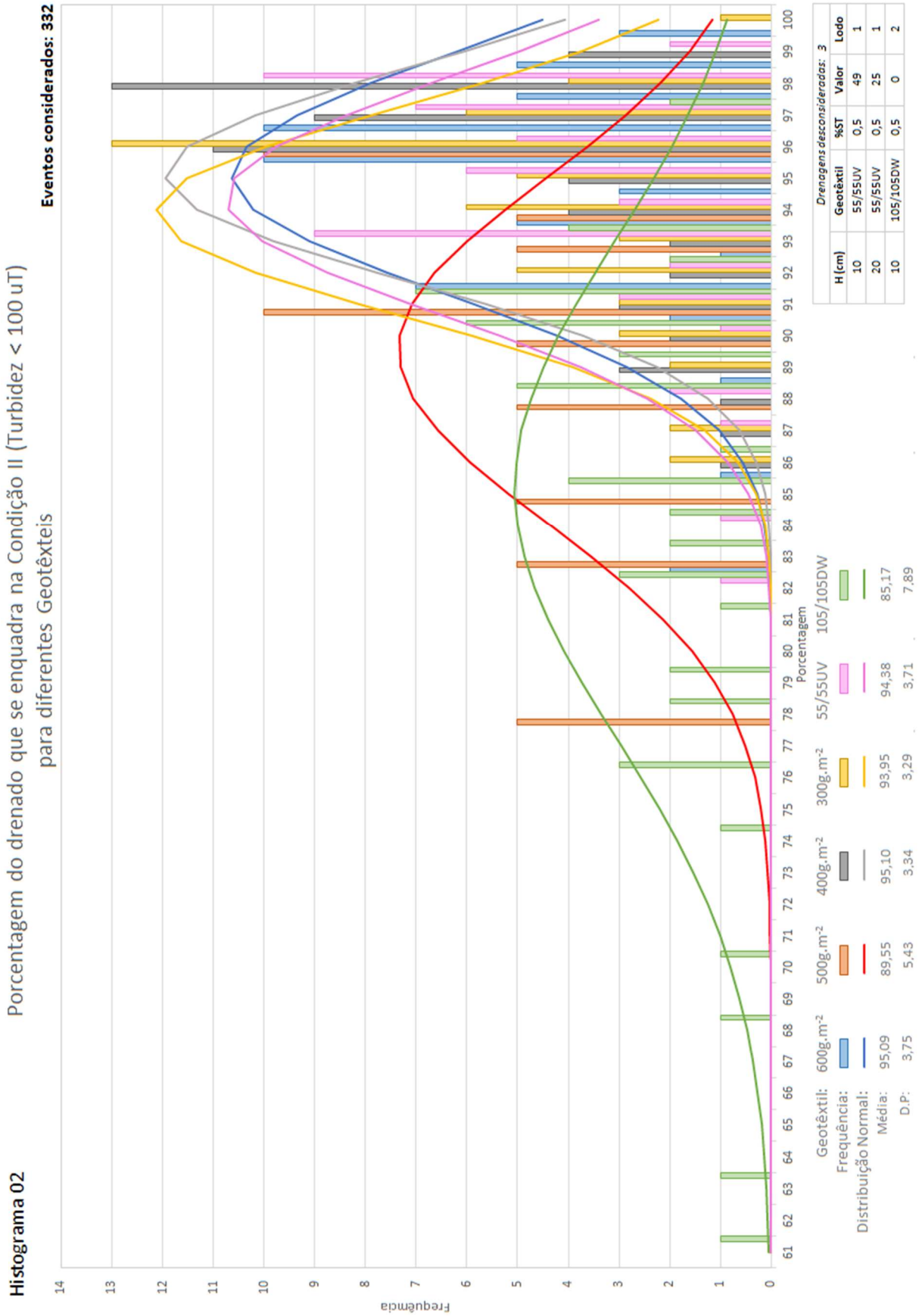
(-) Drenagens que não acabaram suas vazões no tempo observado

a. APÊNDICE II – HISTOGRAMAS

Tabela 9.4 - Índice dos Histogramas

Histograma	Página	Conteúdo do Histograma	Parâmetro analisado
1	219	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição I (Turbidez <40uT) para diferentes Geotêxteis	Geotêxteis
2	220	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição II (Turbidez <100uT) para diferentes Geotêxteis	
3	221	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição III (Turbidez <10uT) para diferentes Geotêxteis	
4	222	Porcentagem do drenado com cor aparente inferior a 75 uH para diferentes Geotêxteis	
5	223	Término da drenagem para diferentes geotêxteis	
6	224	Porcentagem drenada final para diferentes geotêxteis	
7	225	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição I (Turbidez <40uT) para diferentes Alturas de lodo aplicado	Altura da camada de lodo
8	226	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição II (Turbidez <100uT) para diferentes Alturas de lodo aplicado	
9	227	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição III (Turbidez <10uT) para diferentes Alturas de lodo aplicado	
10	228	Porcentagem do drenado com cor aparente inferior a 75 uH para diferentes Alturas de lodo aplicado	
11	229	Término da drenagem para diferentes Alturas de lodo aplicado	
12	230	Porcentagem drenada final para diferentes Alturas de lodo aplicado	
13	231	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição I (Turbidez <40uT) para diferentes %ST do lodo	Teor de sólidos
14	232	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição II (Turbidez <100uT) para diferentes %ST do lodo	
15	233	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição III (Turbidez <10uT) para diferentes %ST do lodo	
16	234	Porcentagem do drenado com cor aparente inferior a 75 uH para diferentes %ST do lodo	
17	235	Término da drenagem para diferentes %ST do lodo	
18	236	Porcentagem drenada final para diferentes %ST do lodo	

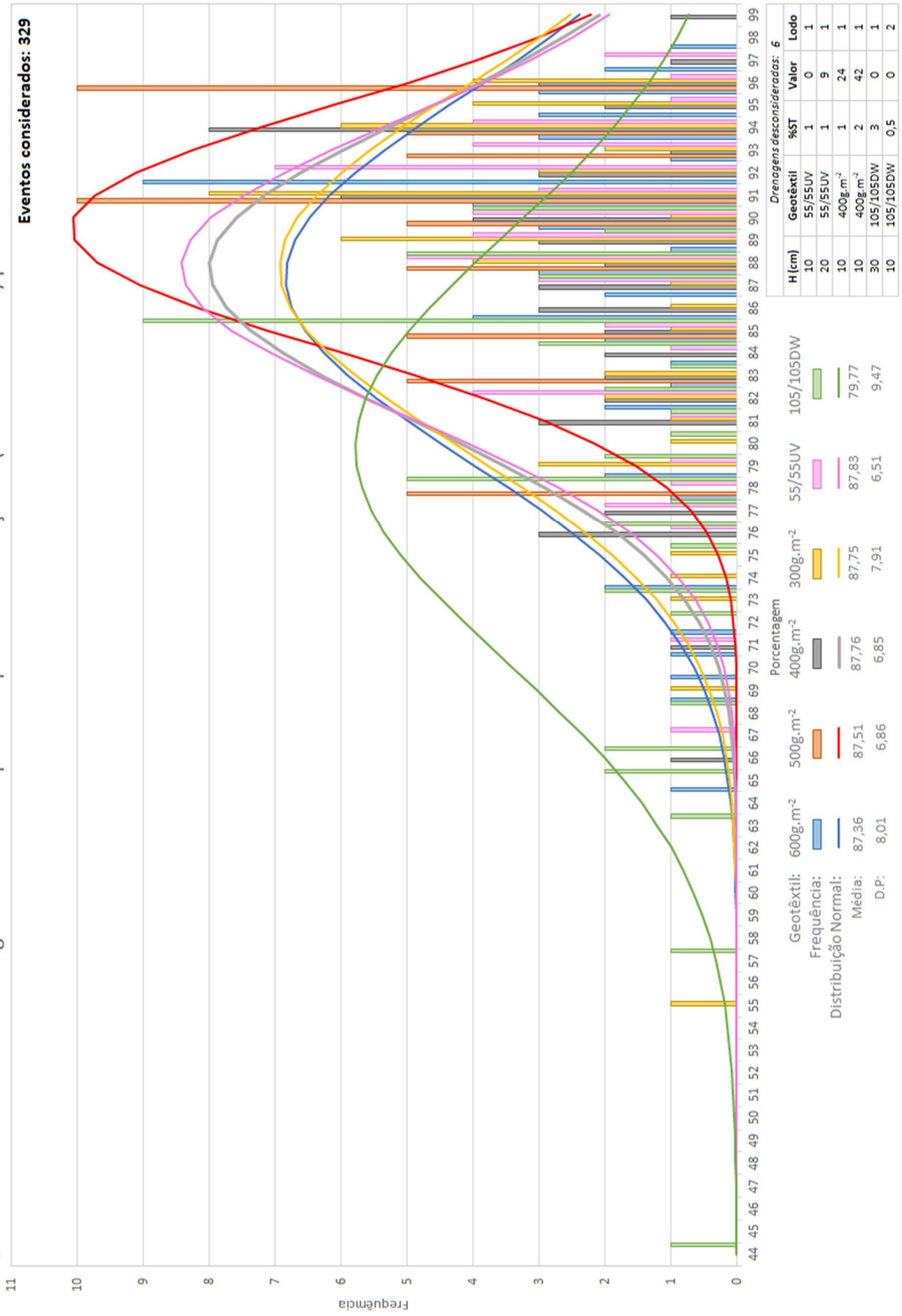
19	237	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição I (Turbidez <40uT) para diferentes Taxas de Aplicação de Sólidos	Taxa de Aplicação de Sólidos
20	238	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição II (Turbidez <100uT) para diferentes Taxas de Aplicação de Sólidos	
21	239	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição III (Turbidez <10uT) para diferentes Taxas de Aplicação de Sólidos	
22	240	Porcentagem do drenado com cor aparente inferior a 75 uH para diferentes Taxas de Aplicação de Sólidos	
23	241	Término da drenagem para diferentes Taxas de Aplicação de Sólidos	
24	242	Porcentagem drenada final para diferentes Taxas de Aplicação de Sólidos	
25, 26 e 27	243	Porcentagem do drenado que se enquadra na condição I (Turbidez <40uT), II (Turbidez <100uT) e condição III (Turbidez <10uT) para as duas campanhas de coleta de lodo	Campa- nha de coleta de lodo
28, 29 e 30	244	Porcentagem do drenado com cor aparente inferior a 75 uH , Término da drenagem e Porcentagem drenada final para as duas campanhas de coleta de lodo	



Histograma 03

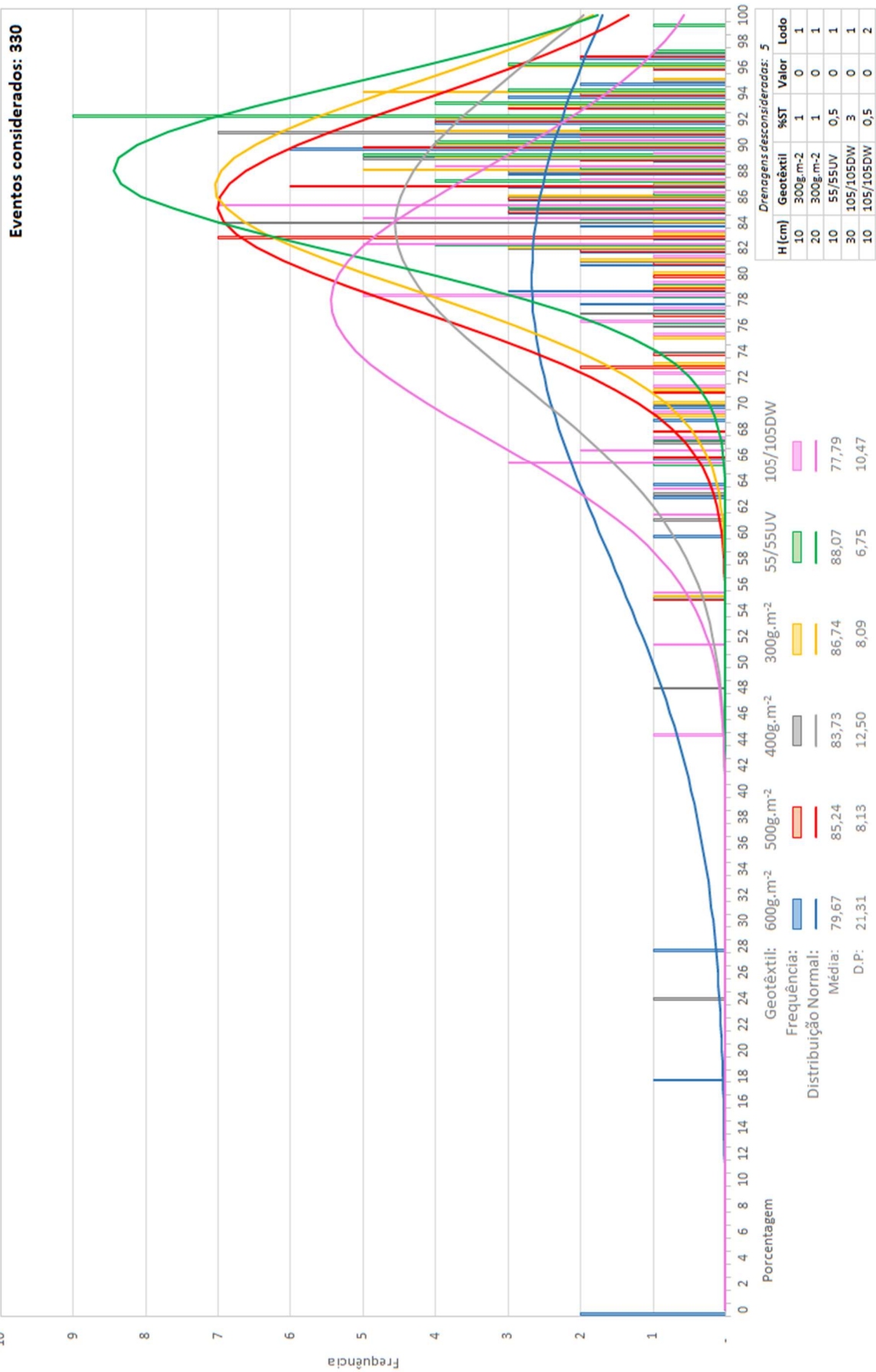
Porcentagem do drenado que se enquadra na Condição III (Turbidez < 10 uT) para diferentes Geotêxteis

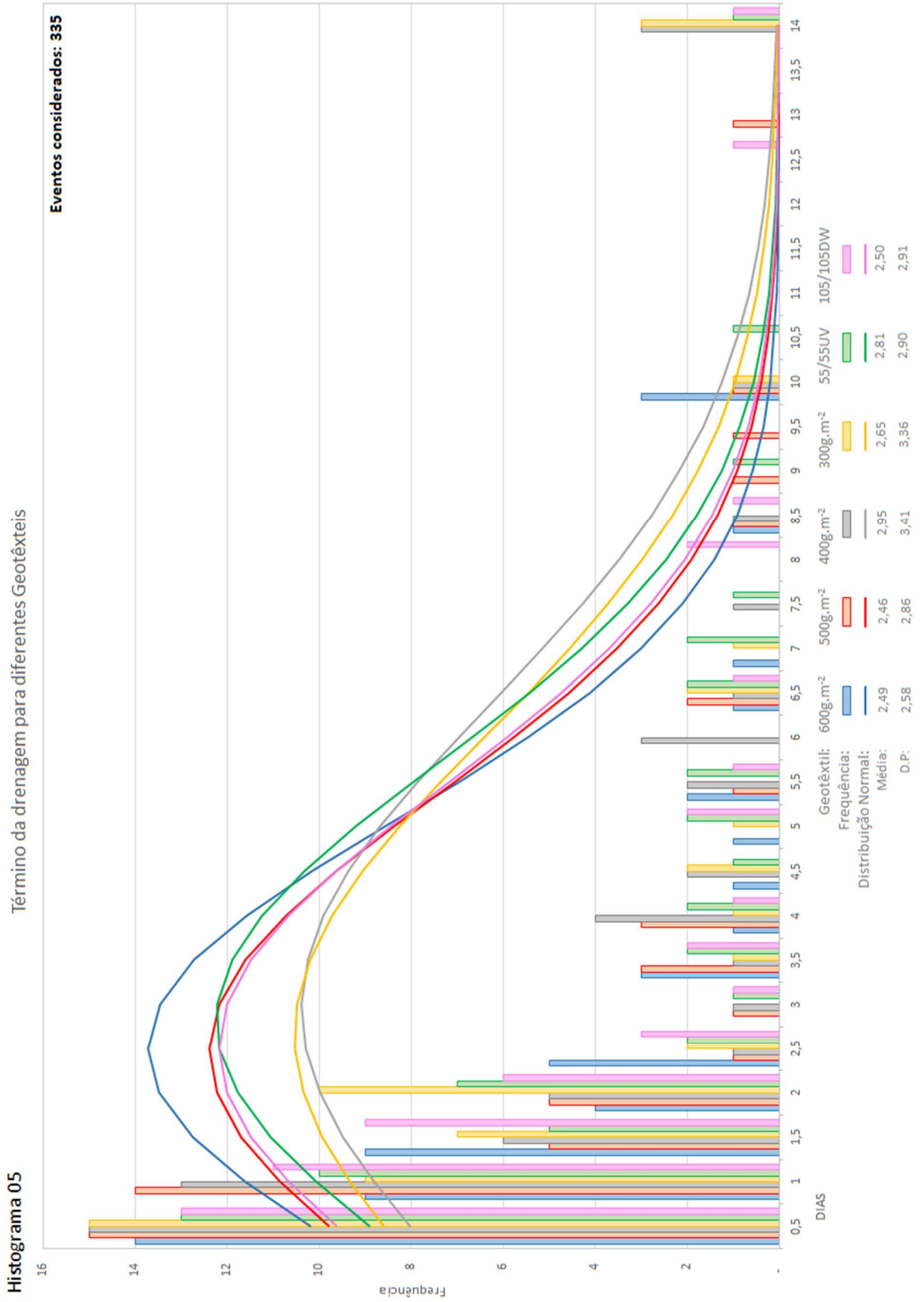
Eventos considerados: 329



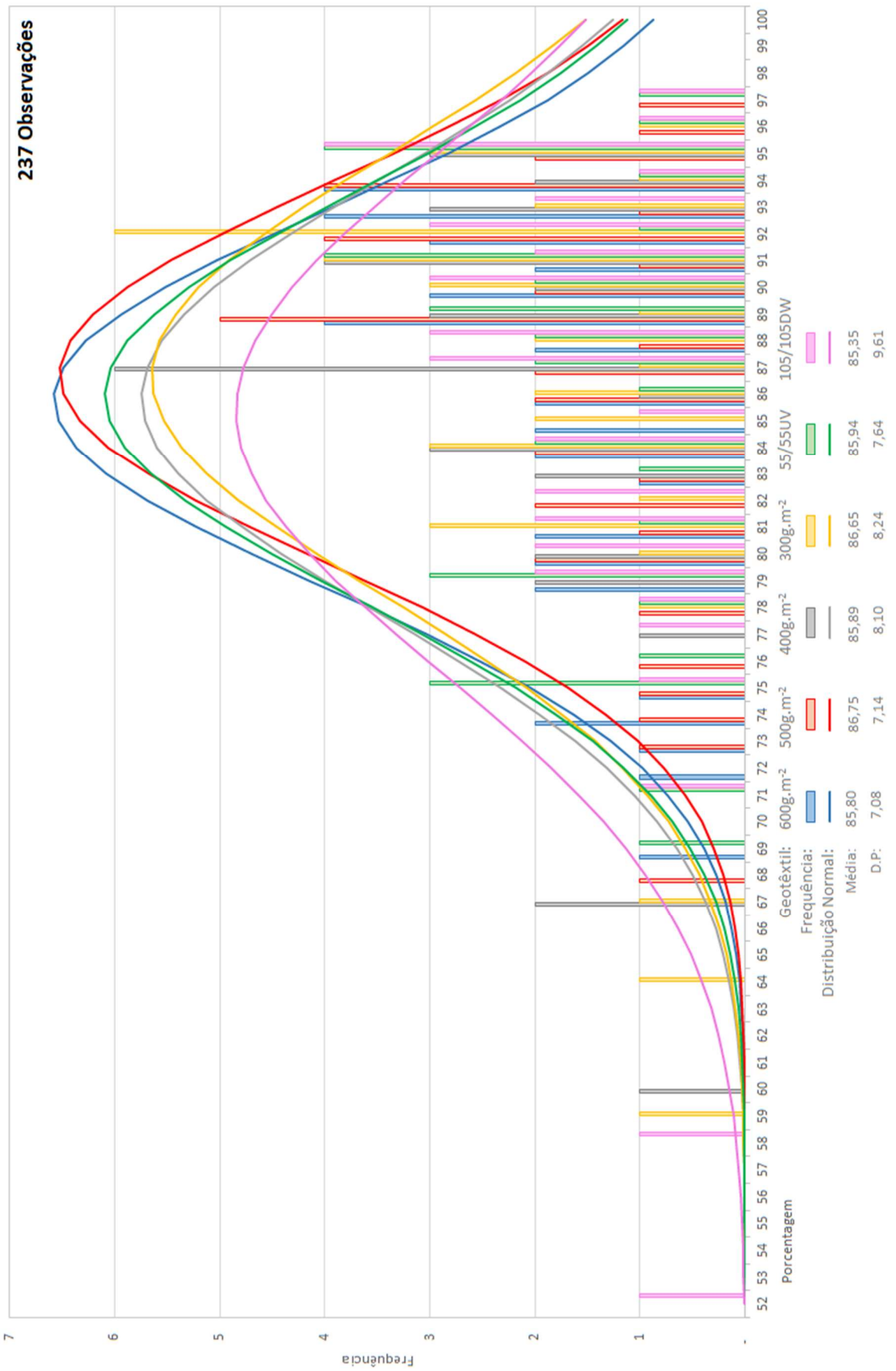
Histograma 04

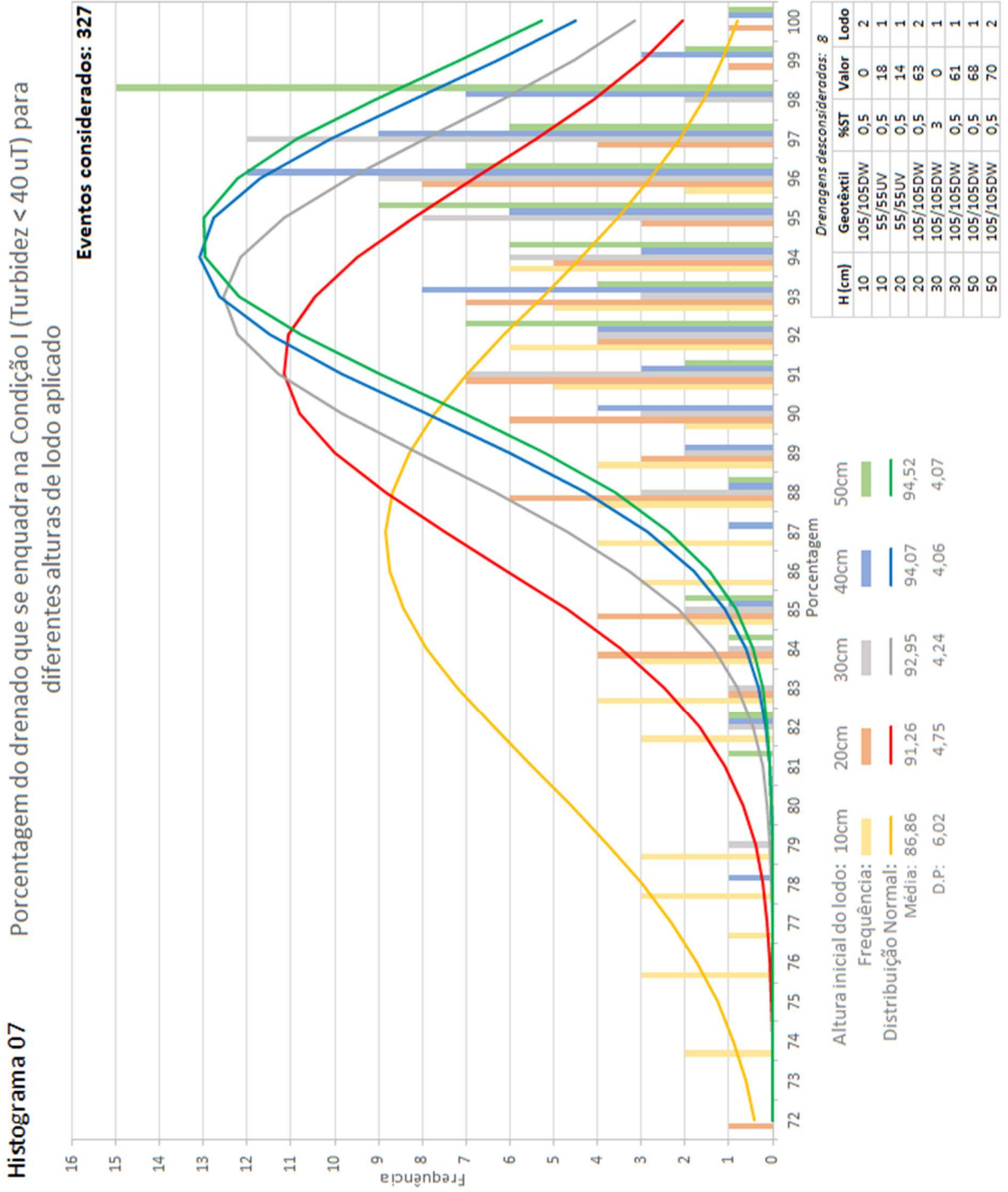
Porcentagem do drenado com Cor < 75 UH para diferentes tipos de Geotêxteis



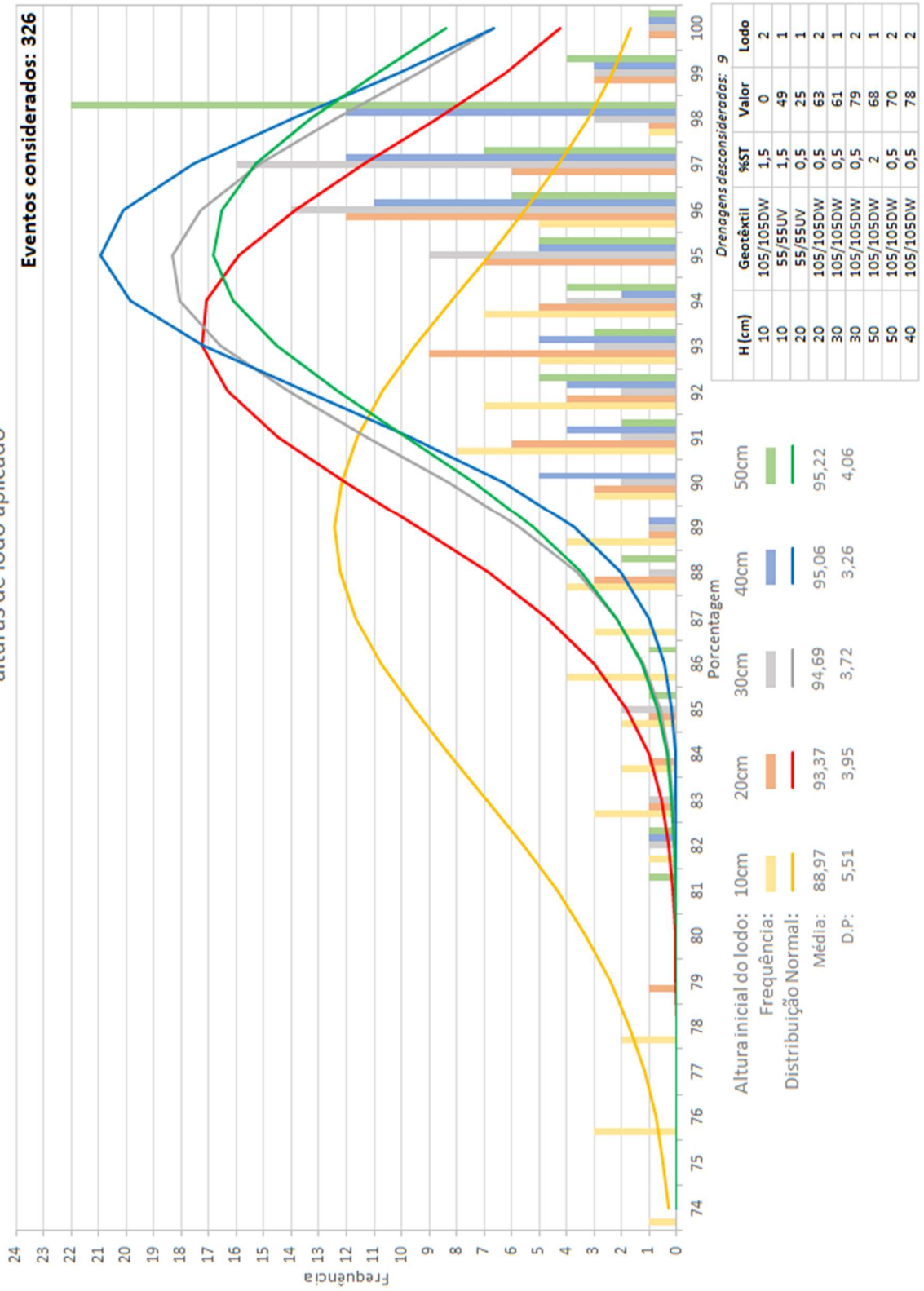


Histograma 06 Porcentagem Drenada final para diferentes tipos de Geotêxteis

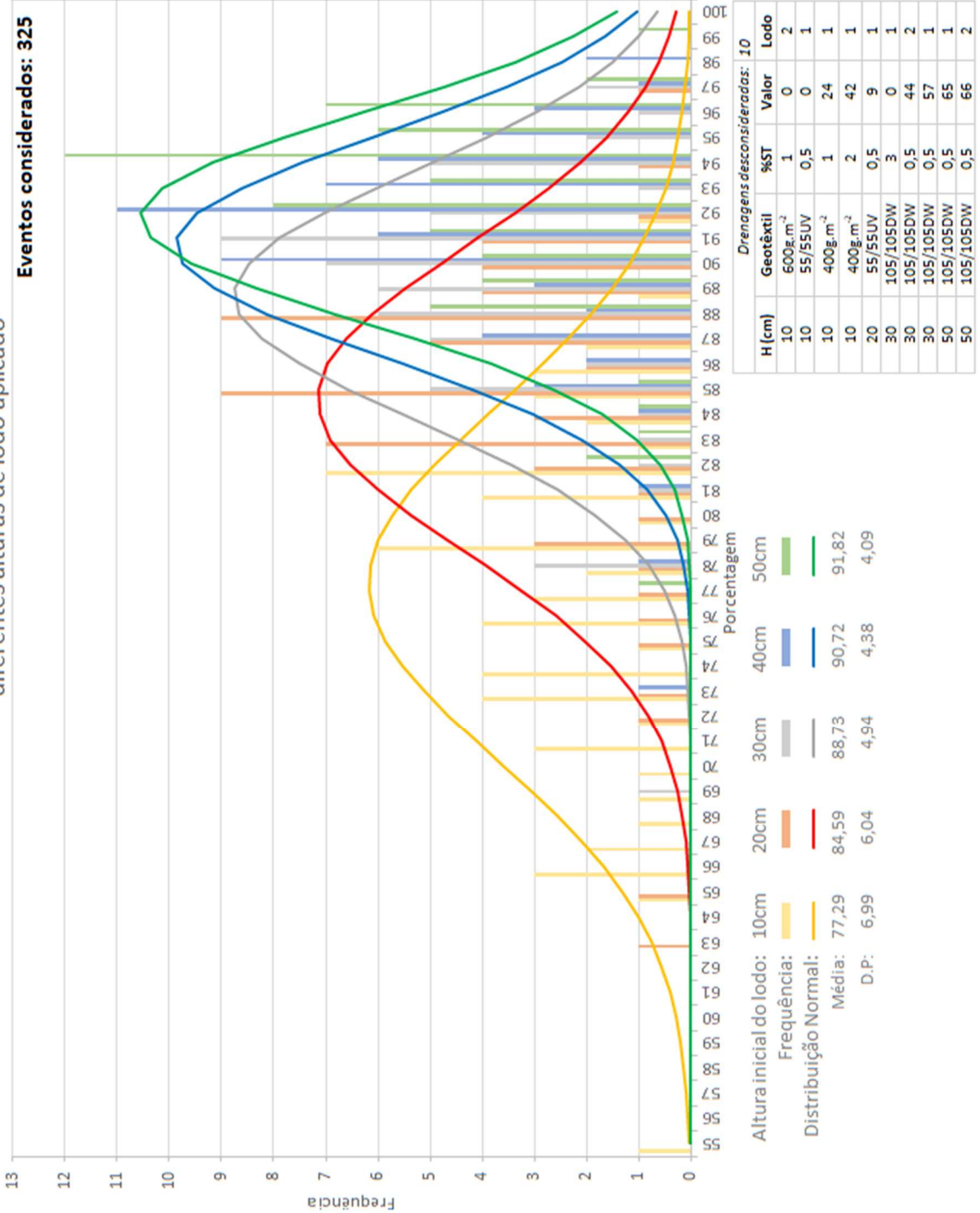


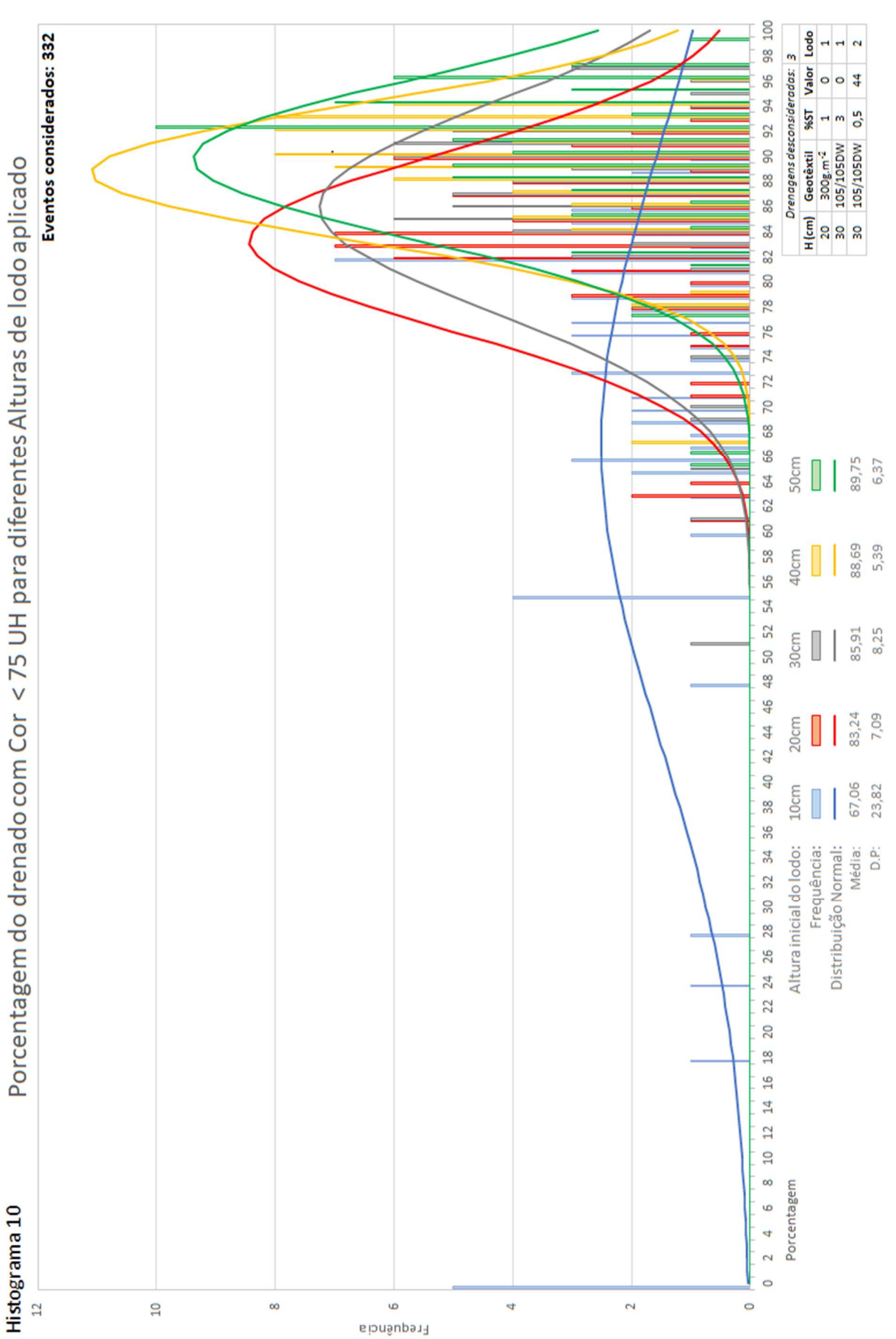


Histograma 08 Porcentagem do drebado que enquadra na Condição II (Turbidez < 100 uT) para diferentes alturas de lodo aplicado

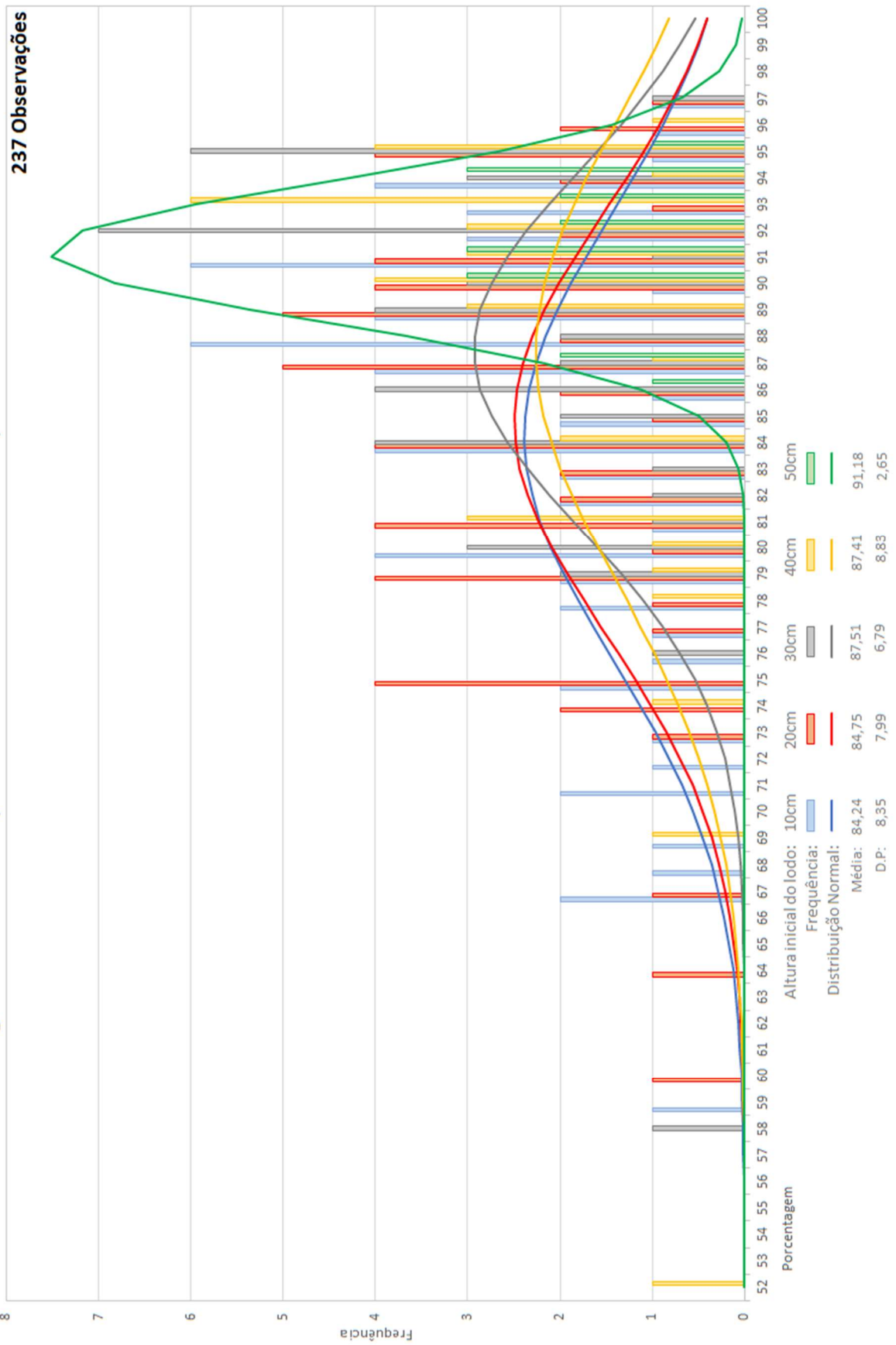


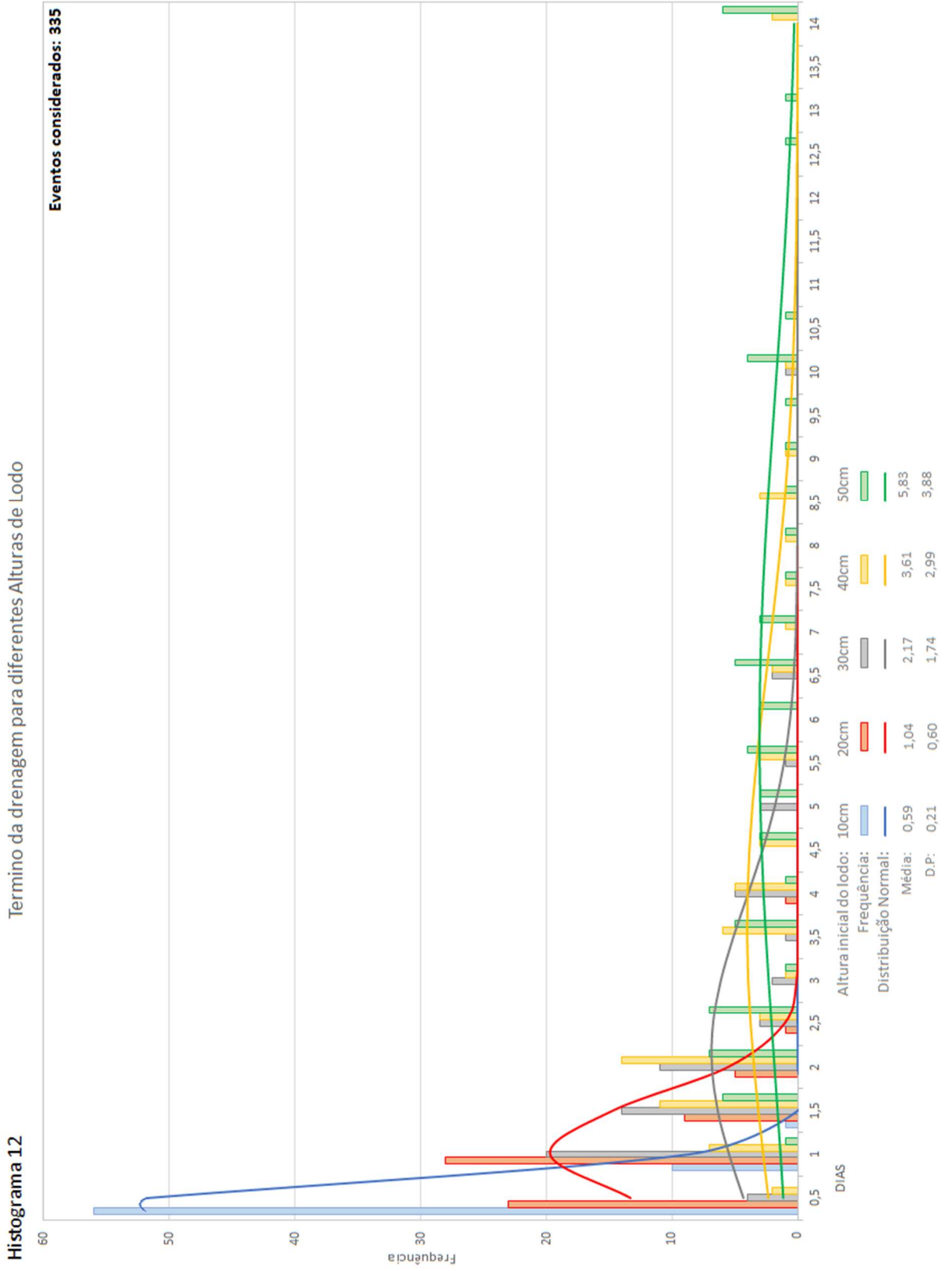
Histograma 09 Porcentagem do drenado que se enquadra na Condição III (Turbidez < 10 uT) para diferentes alturas de lodo aplicado



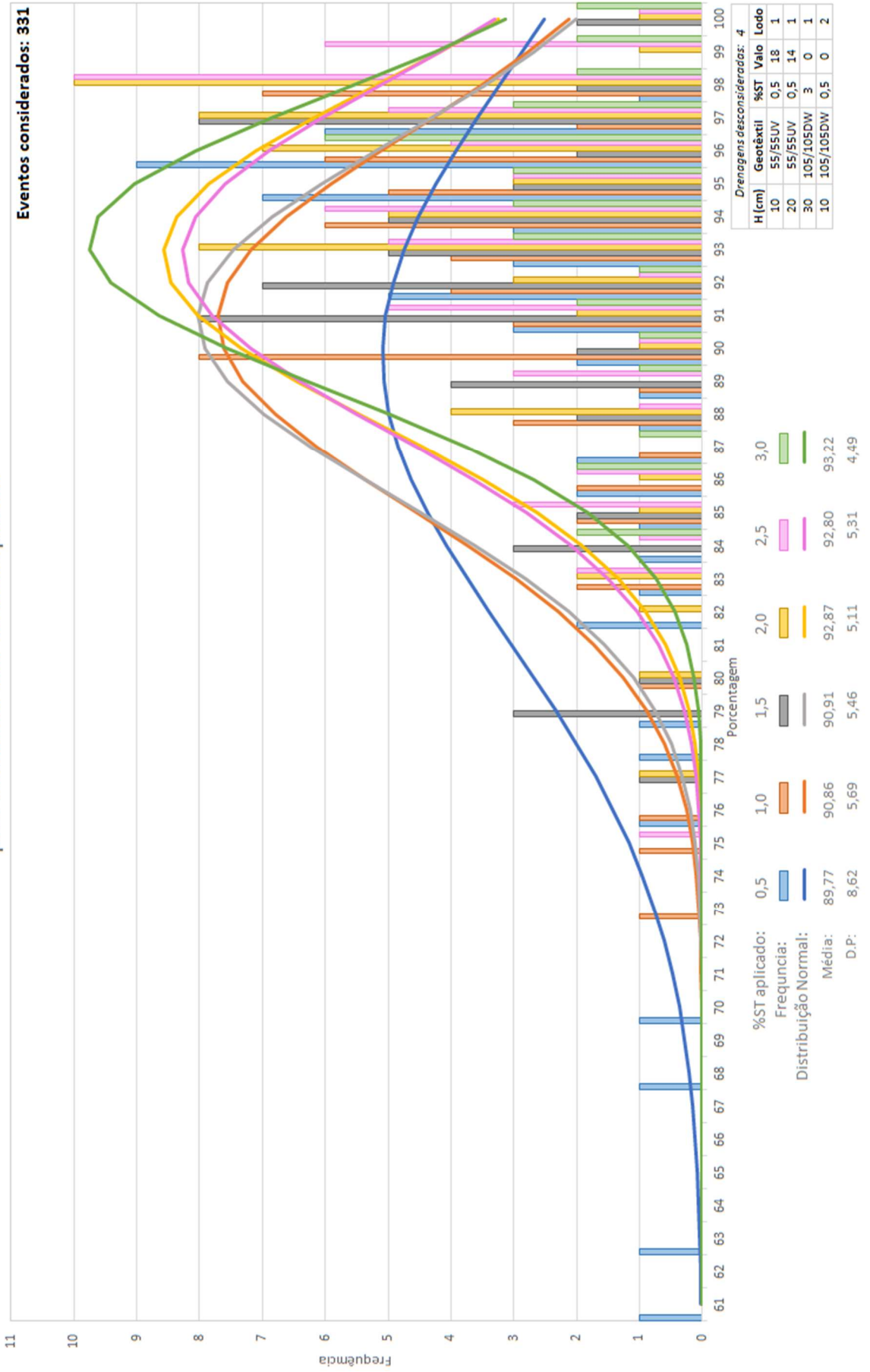


Histograma 11 Porcentagem drenada final para diferentes Alturas de lodo aplicado

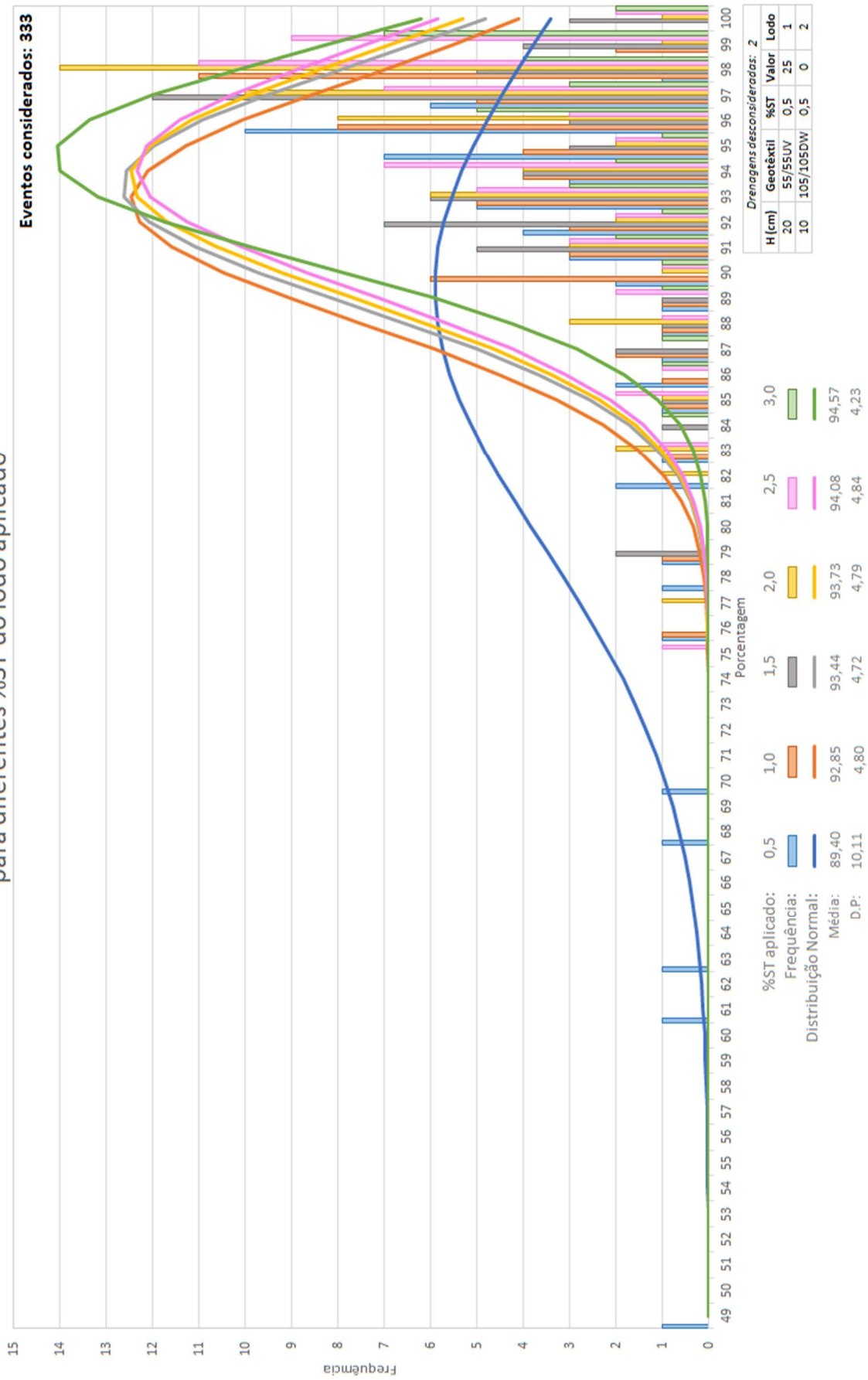




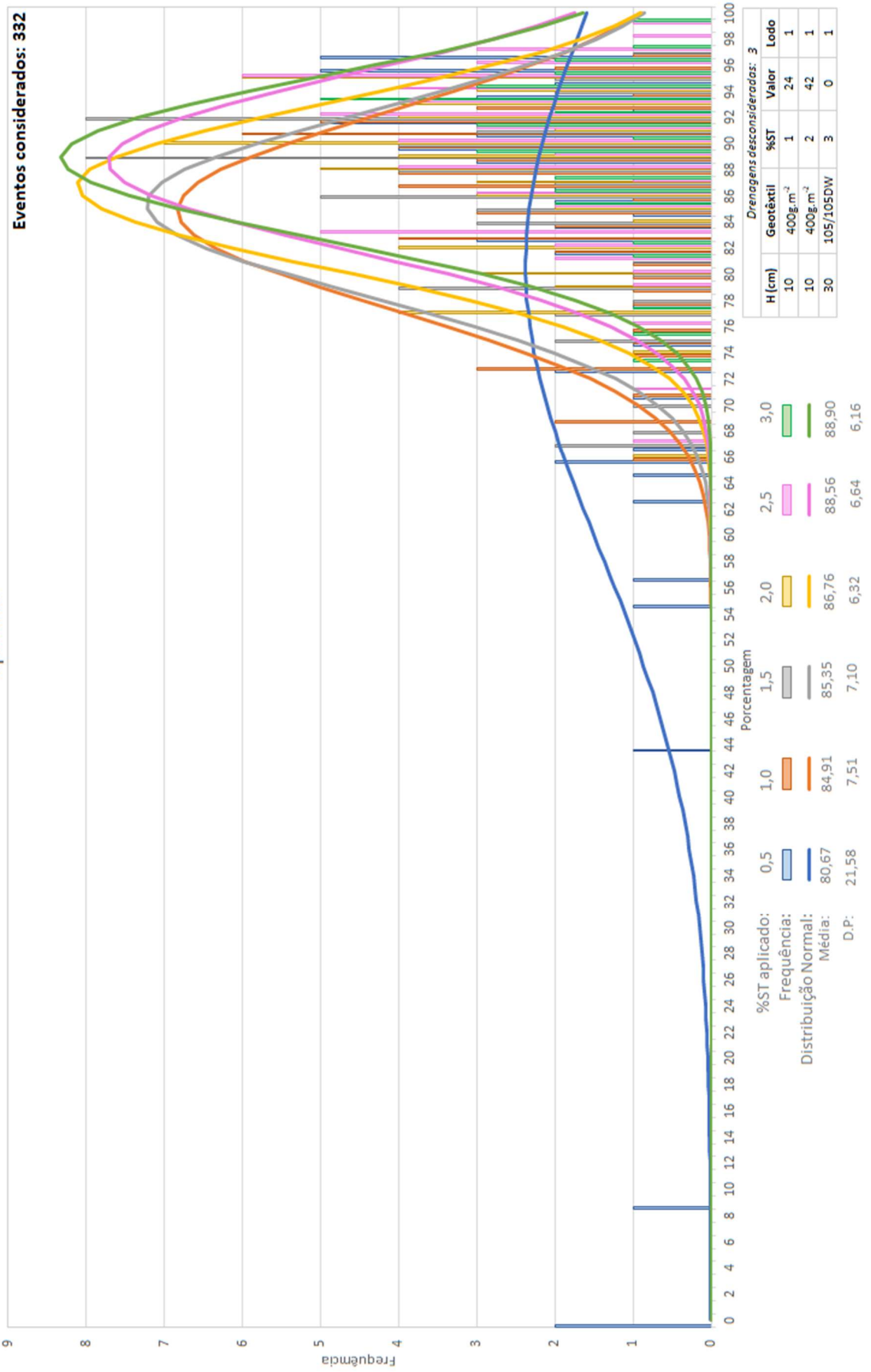
Histograma 13
 Percentagem do drenado que se enquadra na Condição I (Turbidez < 40 uT)
 para diferentes %ST do lodo aplicado



Histograma 14 Porcentagem do drenado que se enquadra na Condição II (Turbidez < 100 uT) para diferentes %ST do lodo aplicado

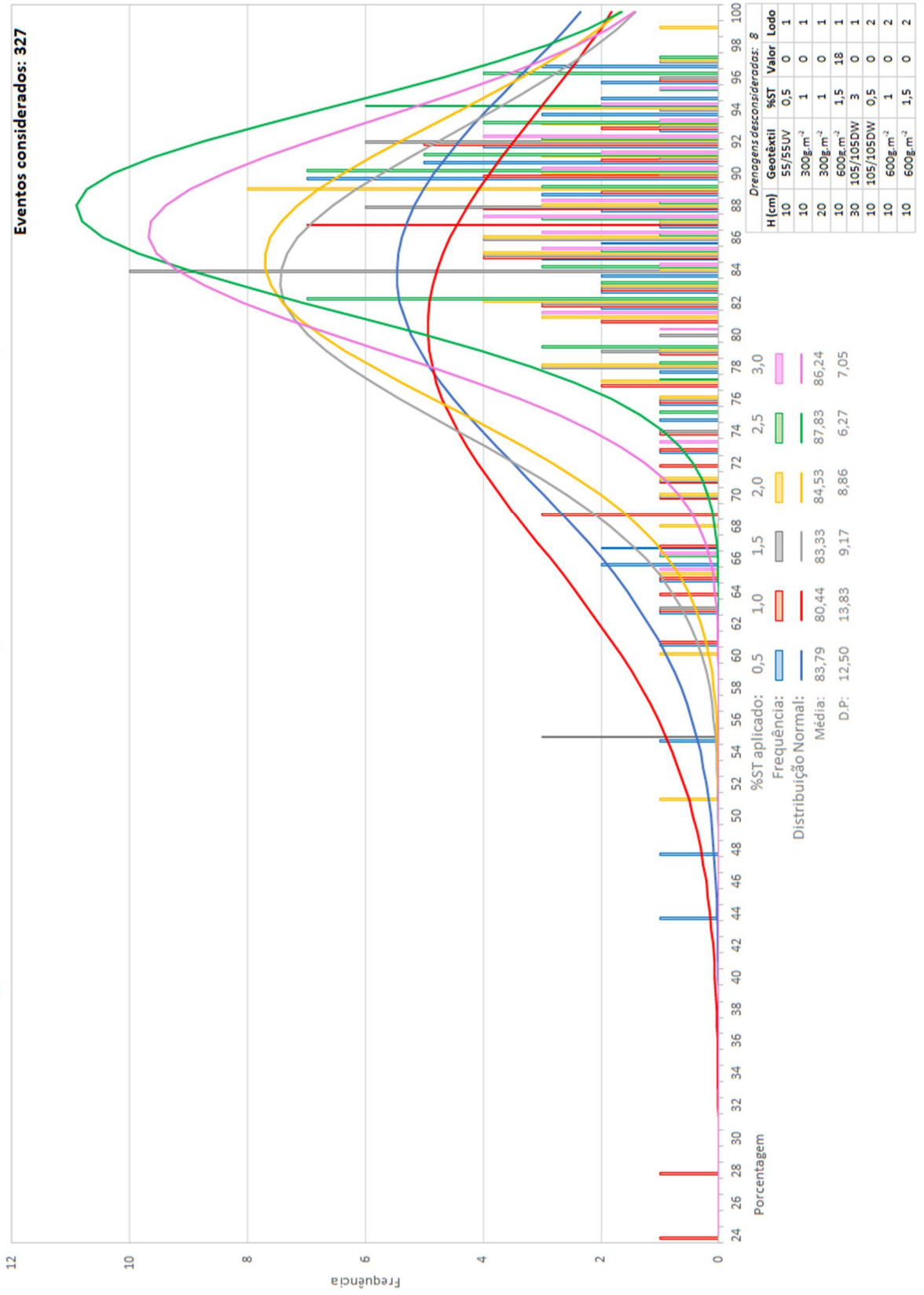


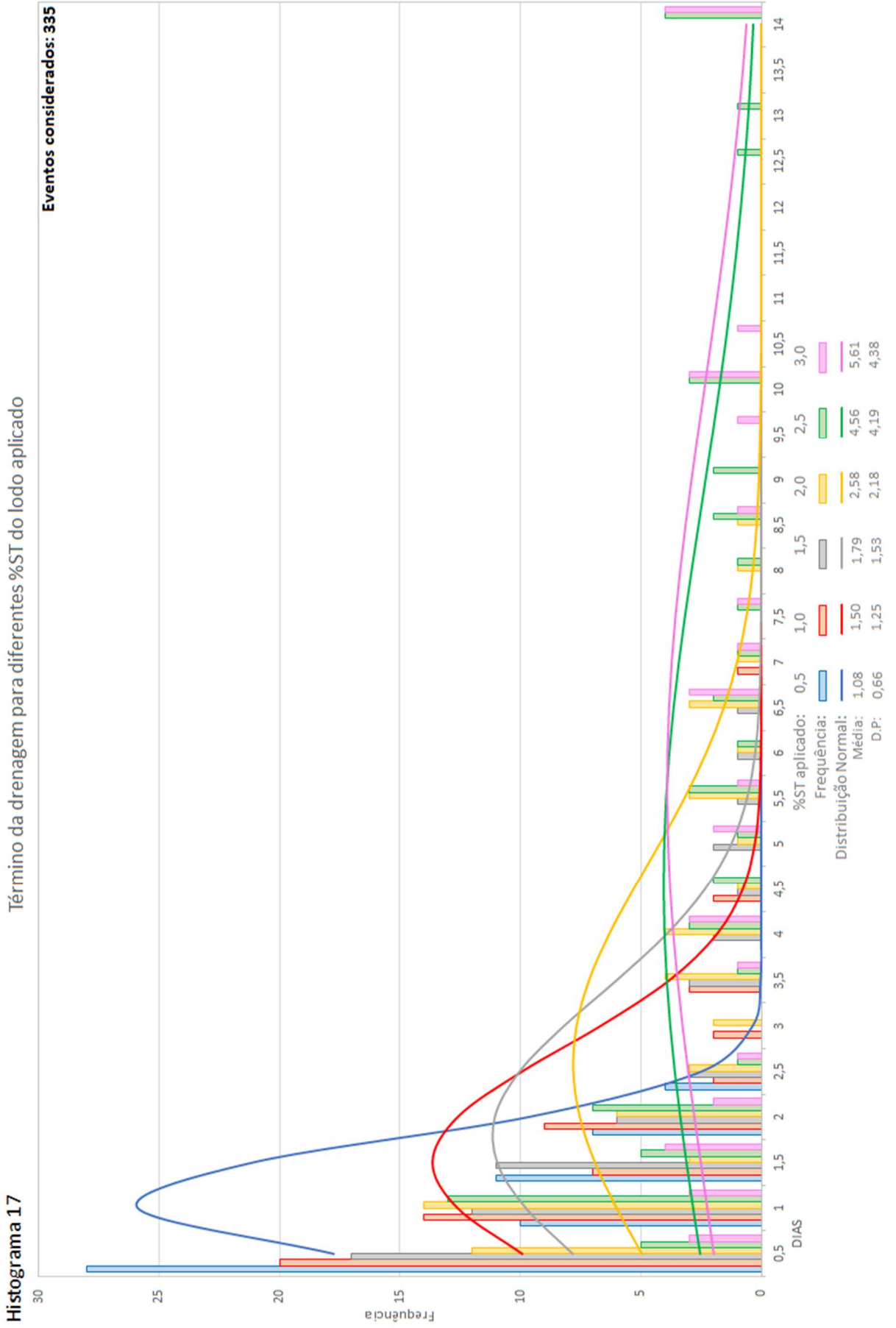
Histograma 15 Porcentagem do drenado que se enquadra na Condição III (Turbidez < 10 uT) para diferentes %ST do lodo aplicado



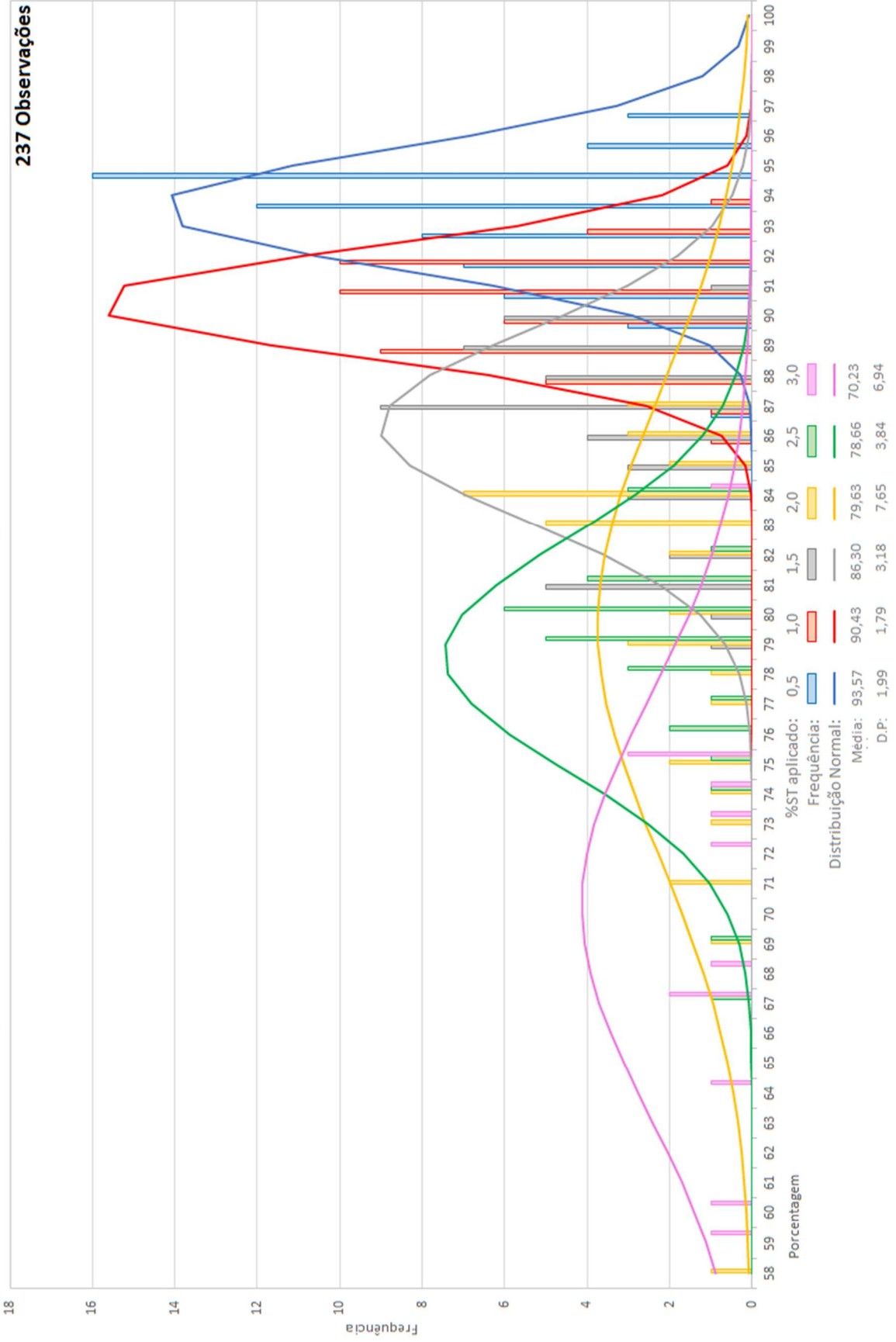
Histograma 16

Porcentagem do drenado com Cor < 75 UH para diferentes %ST de lodo aplicado

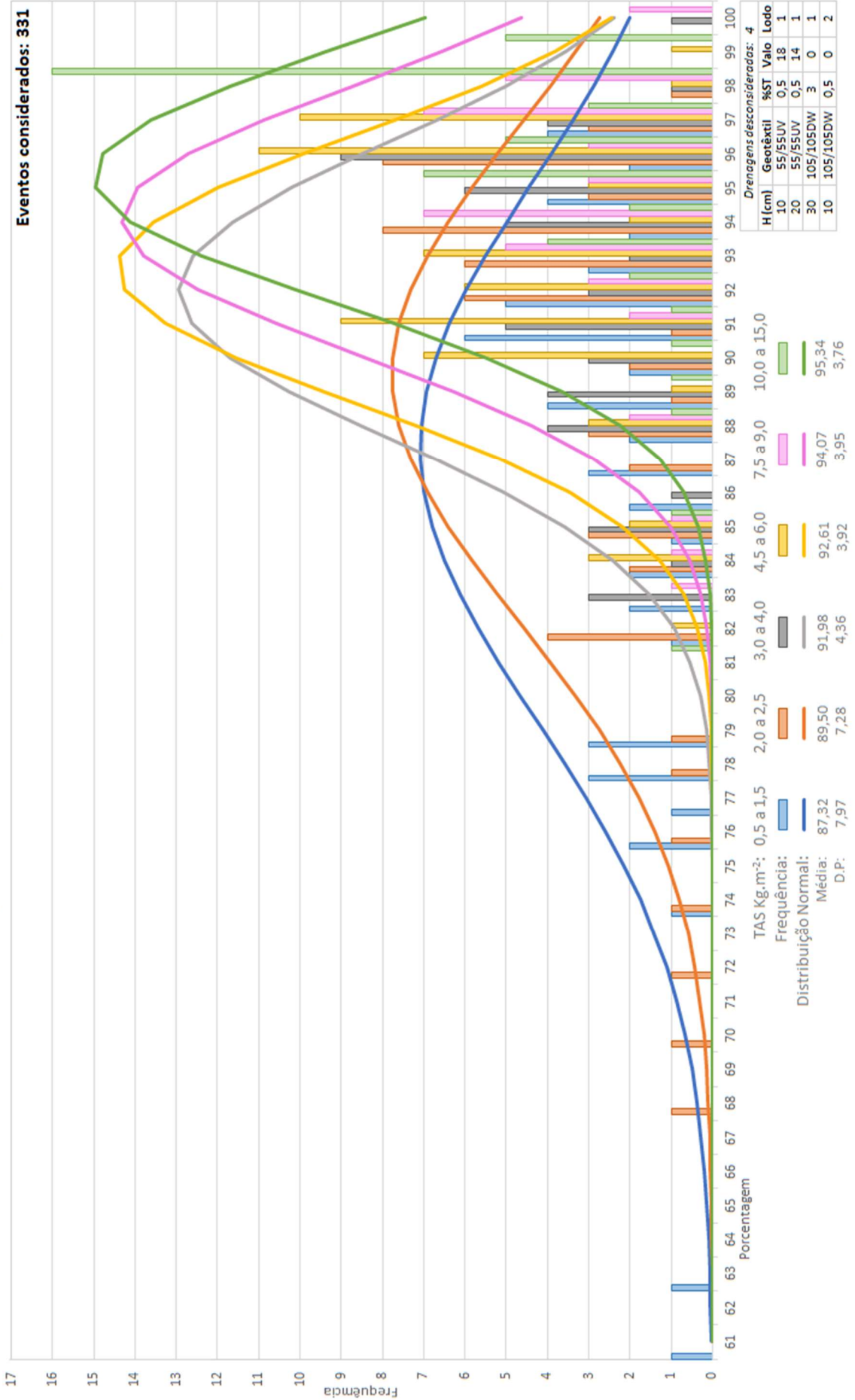




Histograma 18 Porcentagem drenada final para diferentes %ST de lodo aplicado

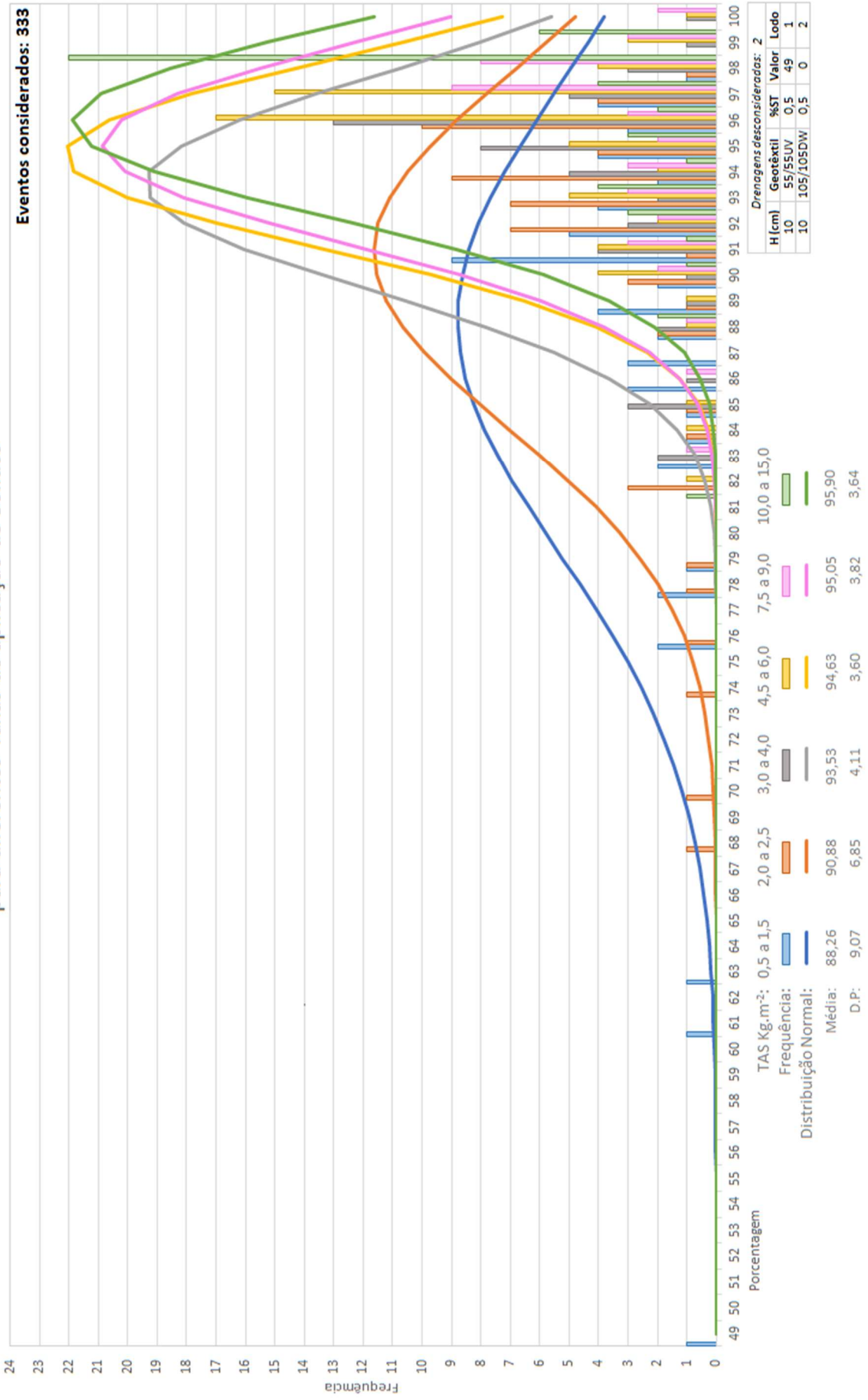


Histograma 19
 Percentagem do drenado que se enquadra na Condição I (Turbidez < 40 uT)
 para diferentes Taxas de aplicação de Sólidos

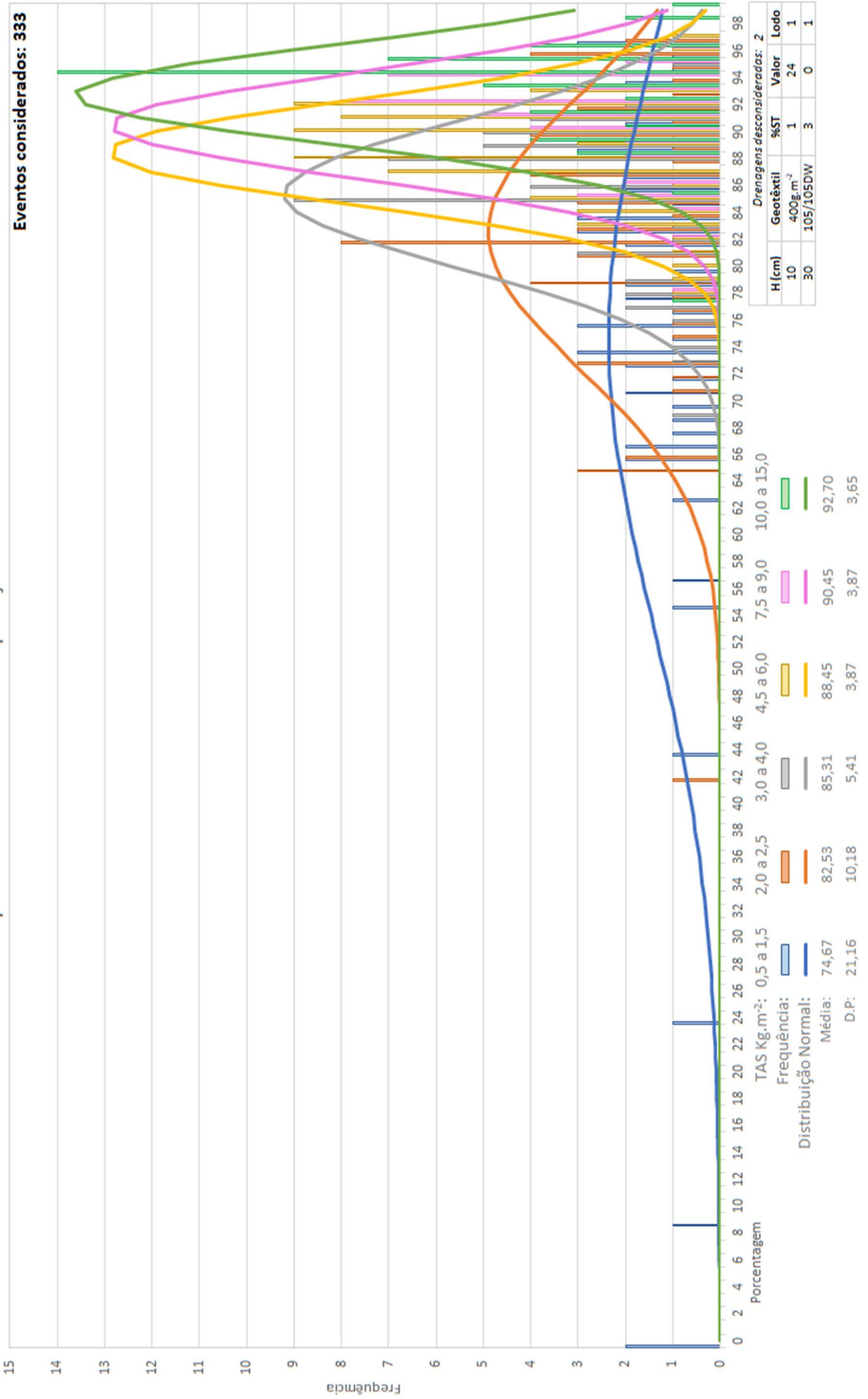


Histograma 20

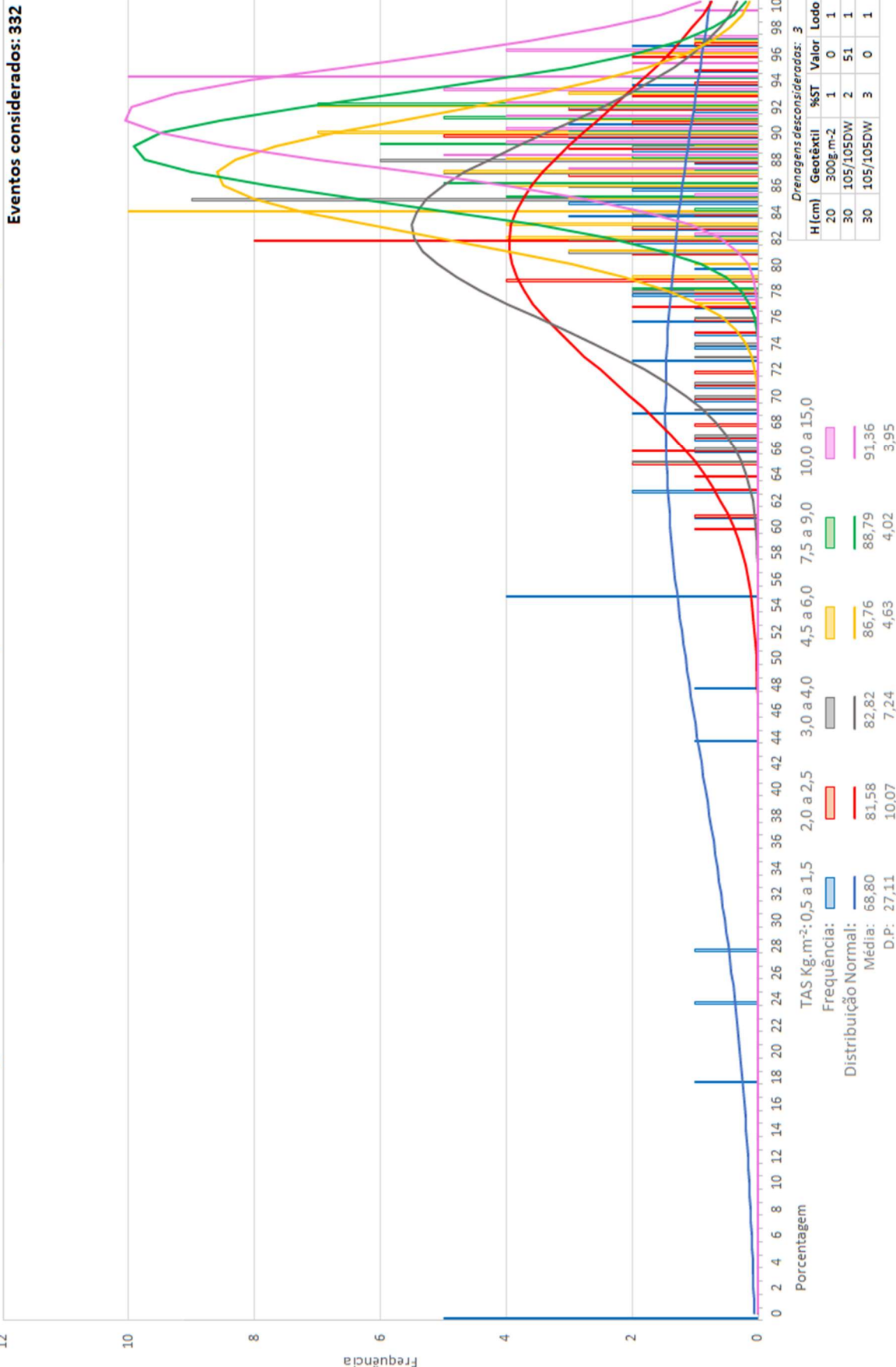
Porcentagem do drenado que se enquadra na Condição II (Turbidez < 100 uT) para diferentes Taxas de aplicação de Sólidos

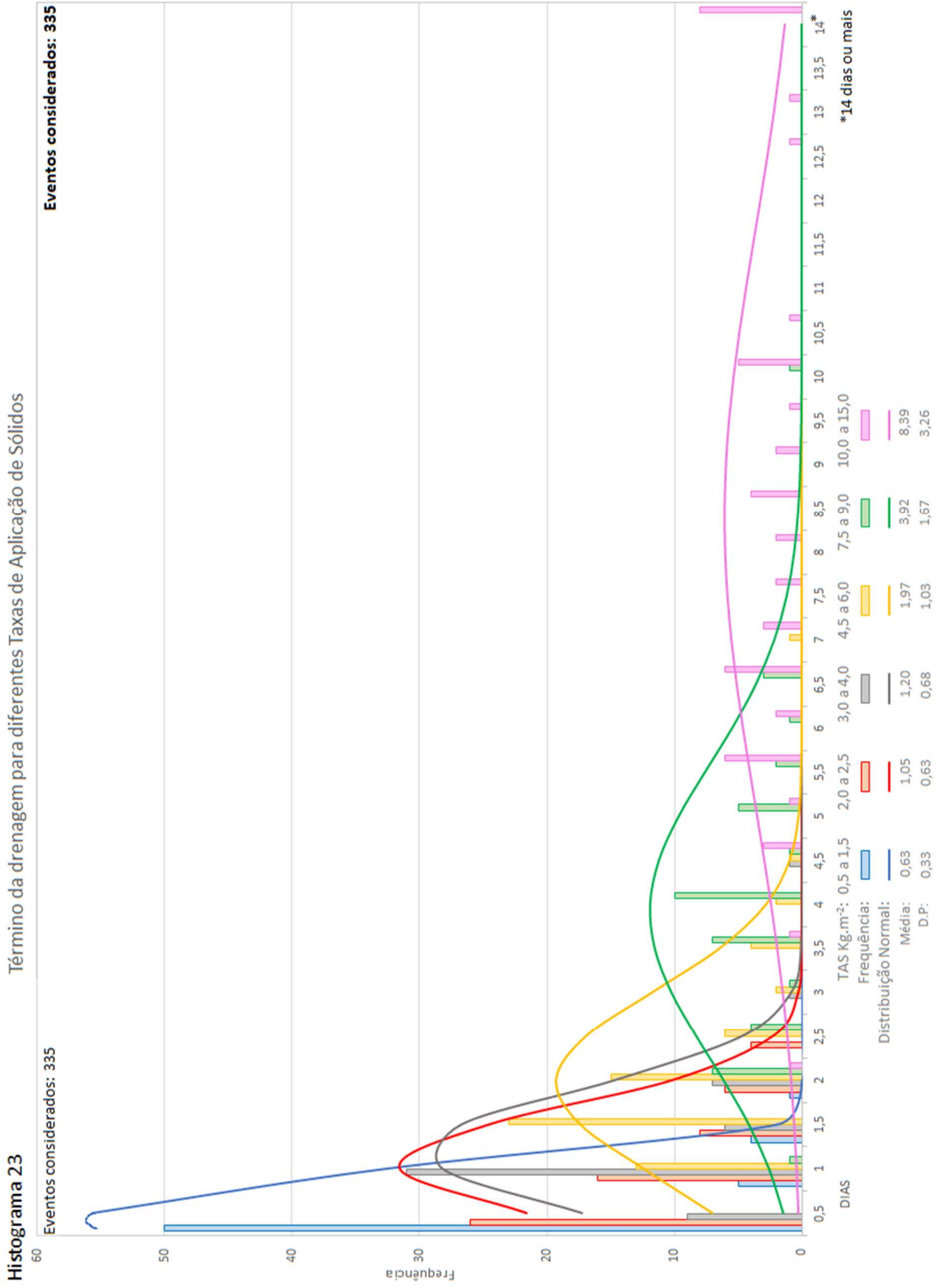


Histograma 21 Percentagem do drenado que se enquadra na Condição III (Turbidez < 10 uT) para diferentes Taxas de aplicação de Sólidos



Histograma 22 Porcentagem do drenado com Cor < 75 UH para diferentes Taxas de aplicação de sólidos





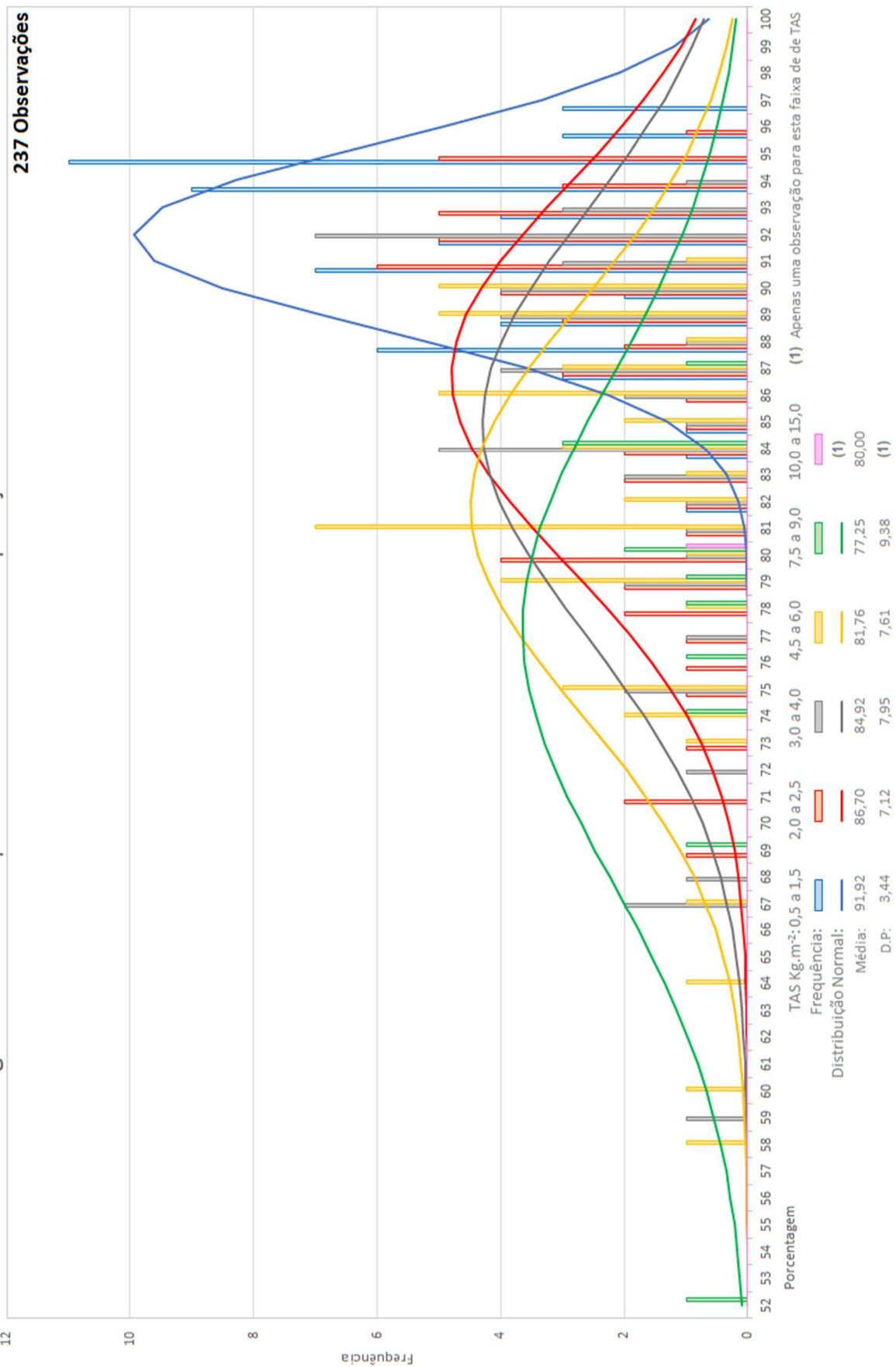
Histograma 23

Termo da drenagem para diferentes Taxas de Aplicação de Sólidos

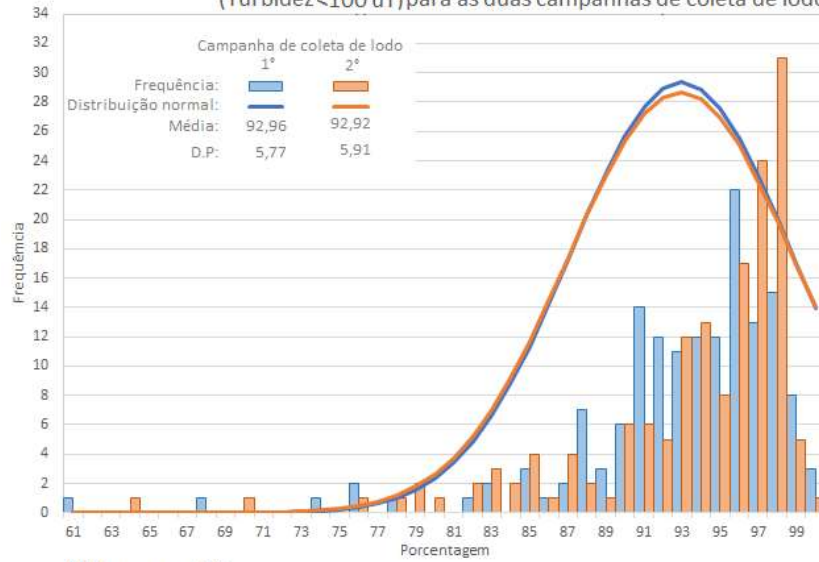
Eventos considerados: 335

Eventos considerados: 335

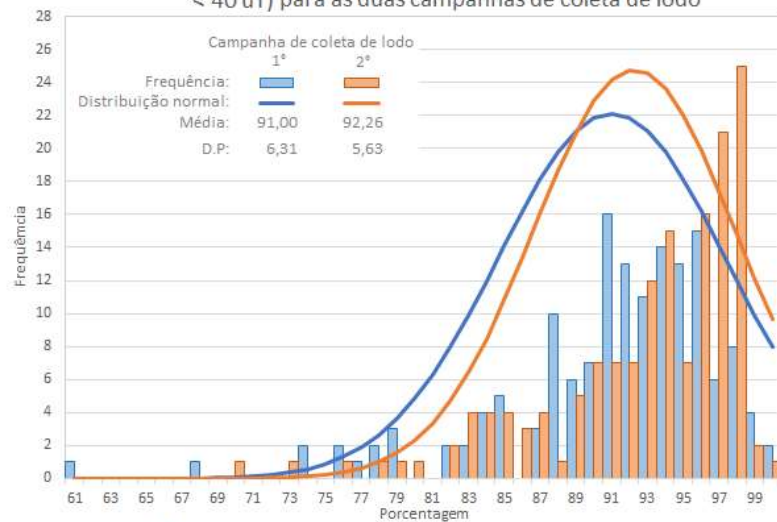
Histograma 24 Porcentagem drenada final para diferentes Taxas de aplicação de sólidos



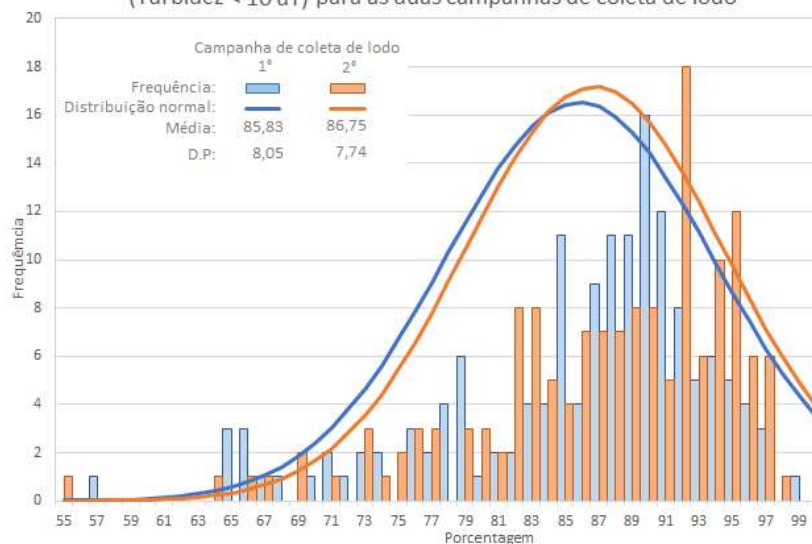
Histograma 25 Percentagem do drenado que se enquadra na Condição II (Turbidez <100 uT) para as duas campanhas de coleta de lodo



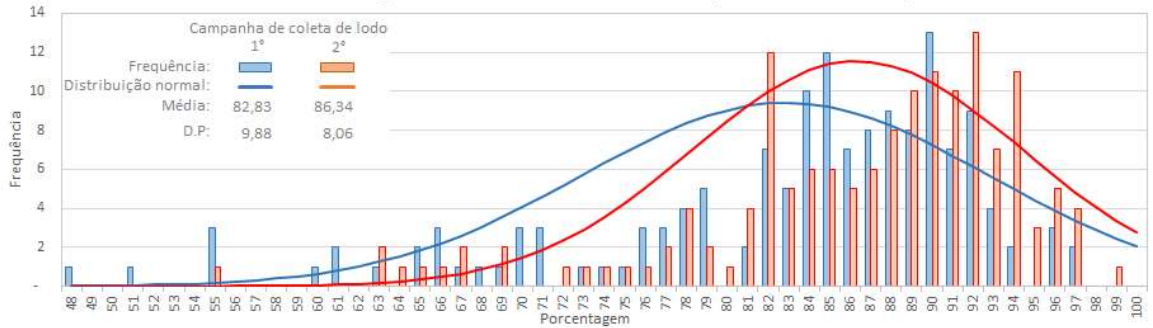
Histograma 26 Percentagem do drenado que se enquadra na Condição I (Turbidez < 40 uT) para as duas campanhas de coleta de lodo



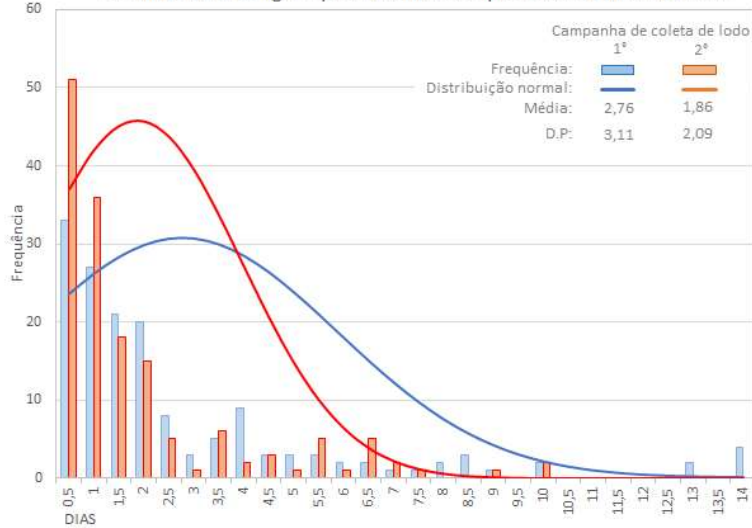
Histograma 27 Percentagem do drenado que se enquadra na Condição III (Turbidez < 10 uT) para as duas campanhas de coleta de lodo



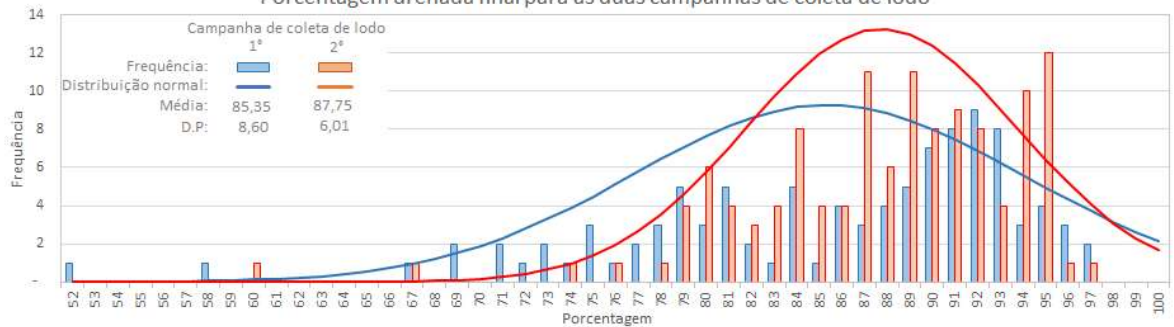
Histograma 28 Percentagem do drenado com Cor < 75 UH para diferentes campanhas de coleta de lodo



Histograma 29 Término da drenagem para as duas campanhas de coleta de lodo

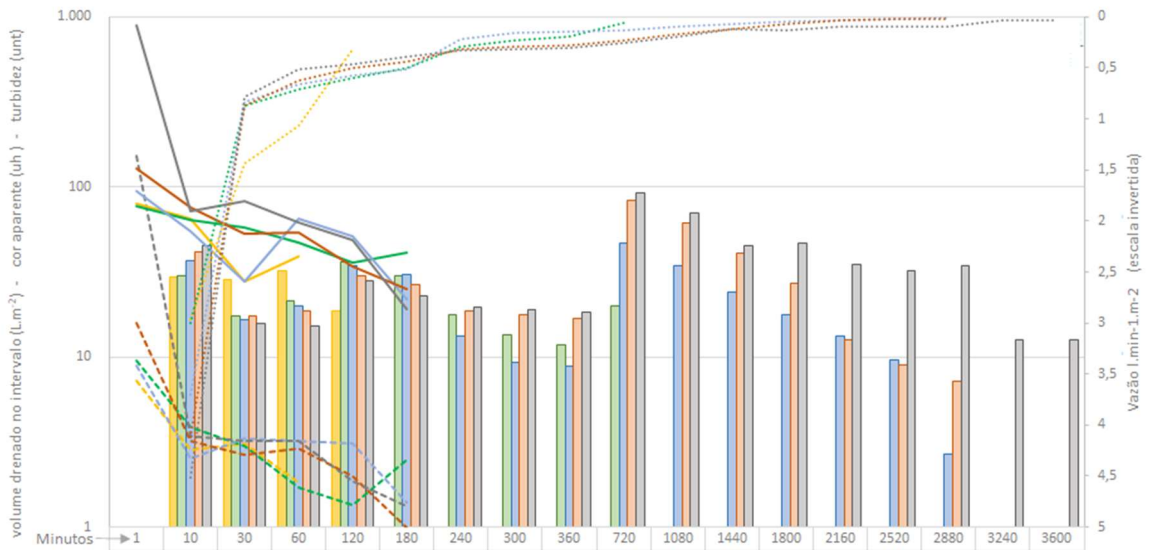
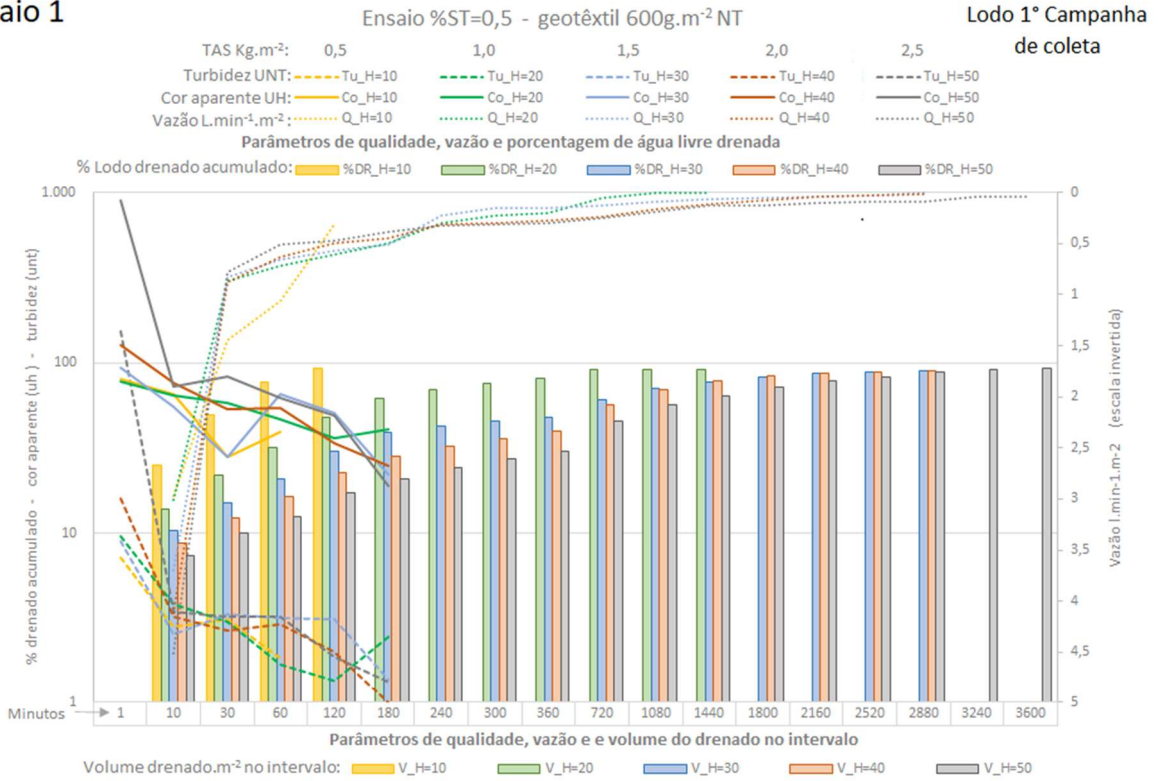


Histograma 30 Percentagem drenada final para as duas campanhas de coleta de lodo



b. APÊNDICE III – resultados dos ensaios

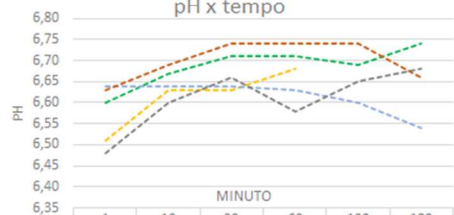
Ensaio 1



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

pH x tempo

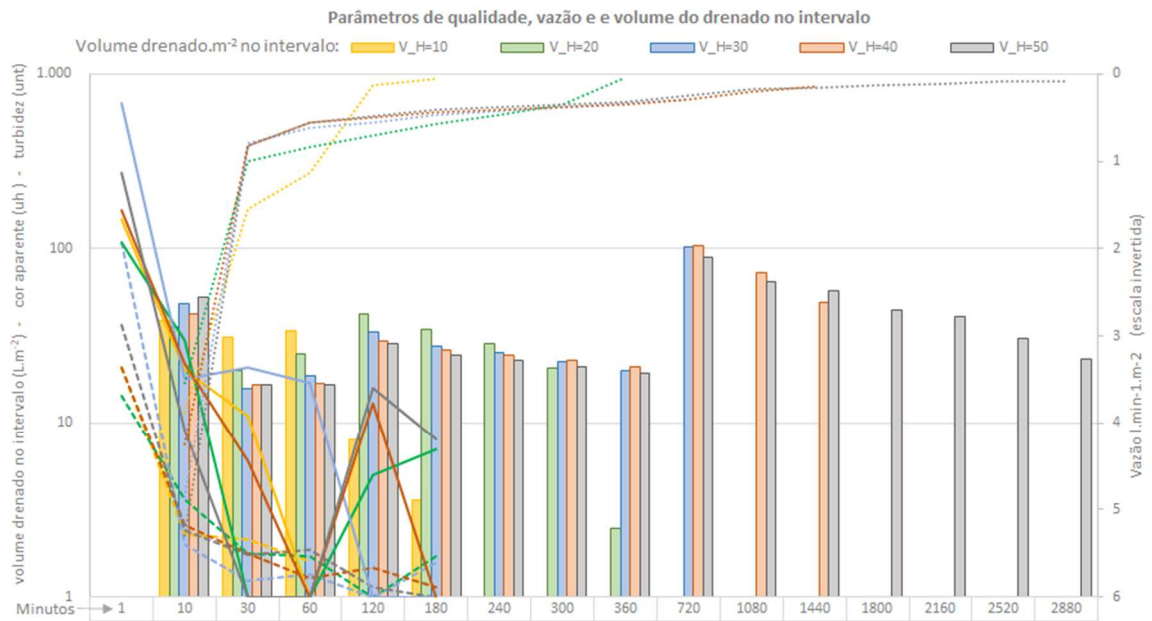
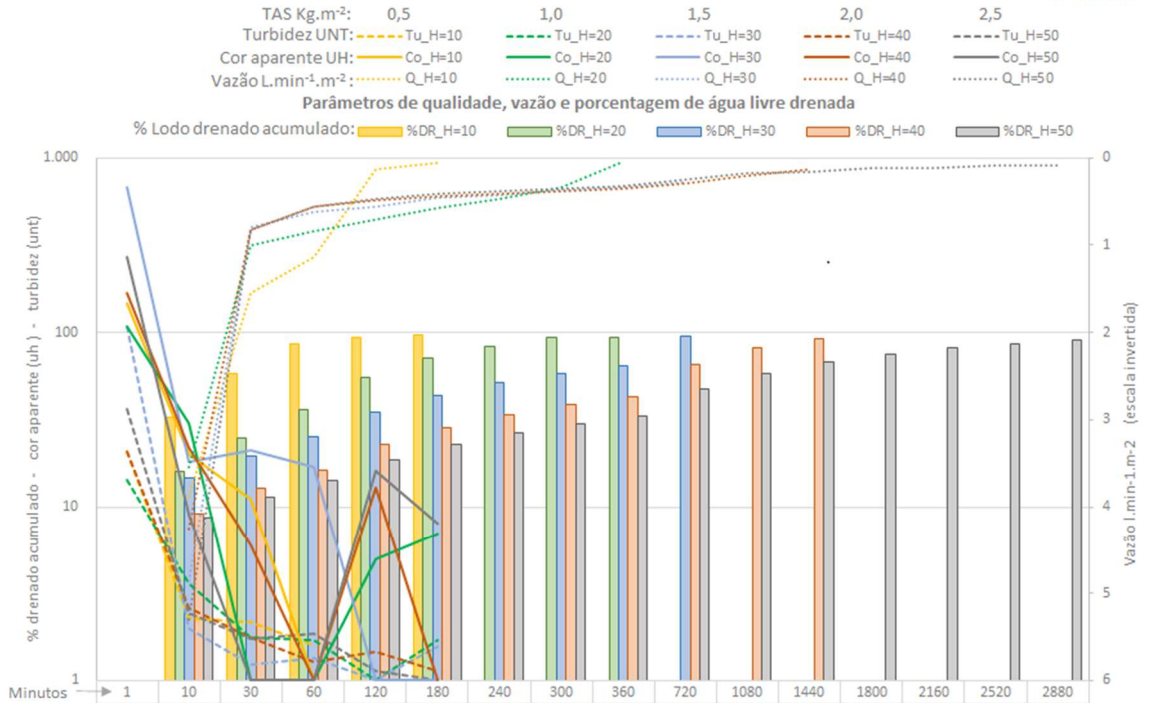


MINUTO	h=10	h=20	h=30	h=40	h=50
1	6,51	6,6	6,64	6,63	6,48
10	6,63	6,67	6,64	6,69	6,6
30	6,63	6,71	6,64	6,74	6,66
60	6,68	6,71	6,63	6,74	6,58
120	6,69	6,69	6,6	6,74	6,65
180	6,74	6,66	6,54	6,66	6,68

Ensaio 2

Lodo 1ª Campanha de coleta

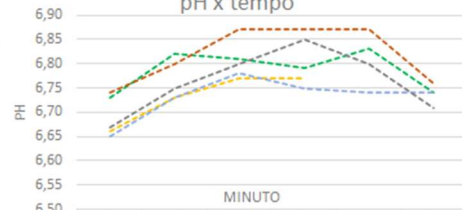
Ensaio %ST=0,5 - geotêxtil 500g.m⁻² NT



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

pH x tempo

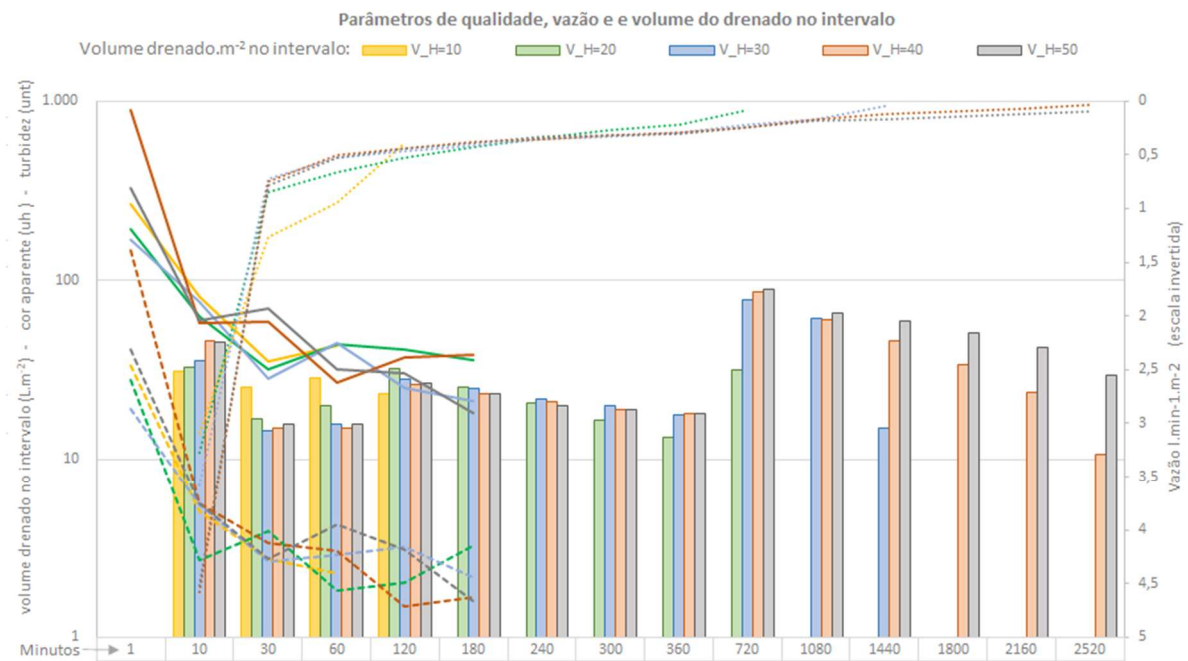
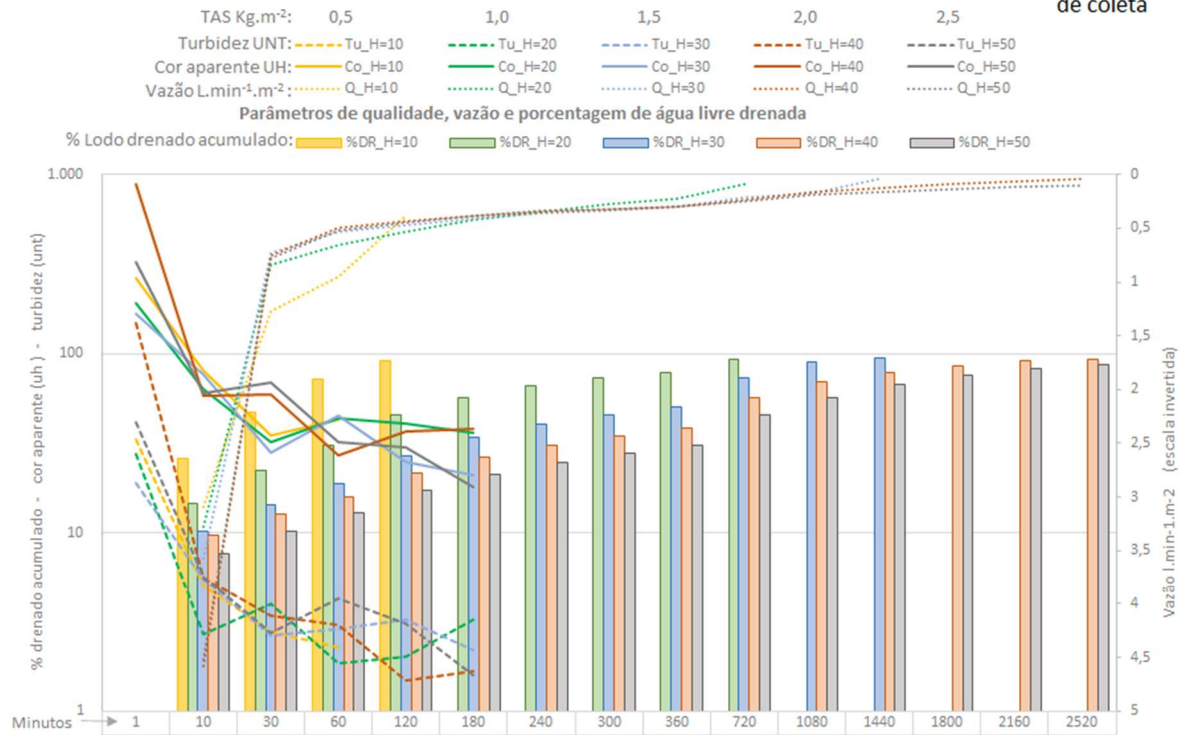


	1	10	30	60	120	180
h=10	6,66	6,73	6,77	6,77	6,74	6,74
h=20	6,73	6,82	6,81	6,79	6,83	6,74
h=30	6,65	6,73	6,78	6,75	6,74	6,74
h=40	6,74	6,8	6,87	6,87	6,87	6,76
h=50	6,67	6,75	6,8	6,85	6,8	6,71

Ensaio 3

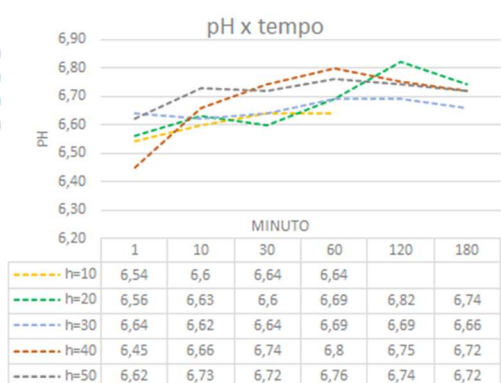
Ensaio %ST=0,5 - geotêxtil 400g.m² NT

Lodo 1^o Campanha de coleta



Legenda Siglas:

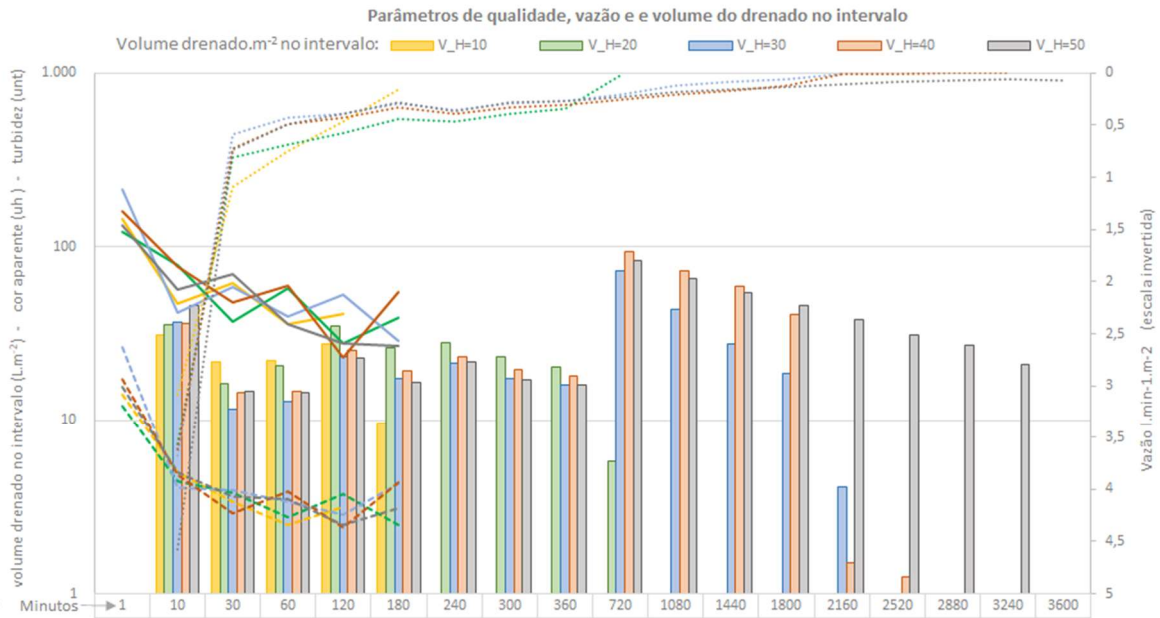
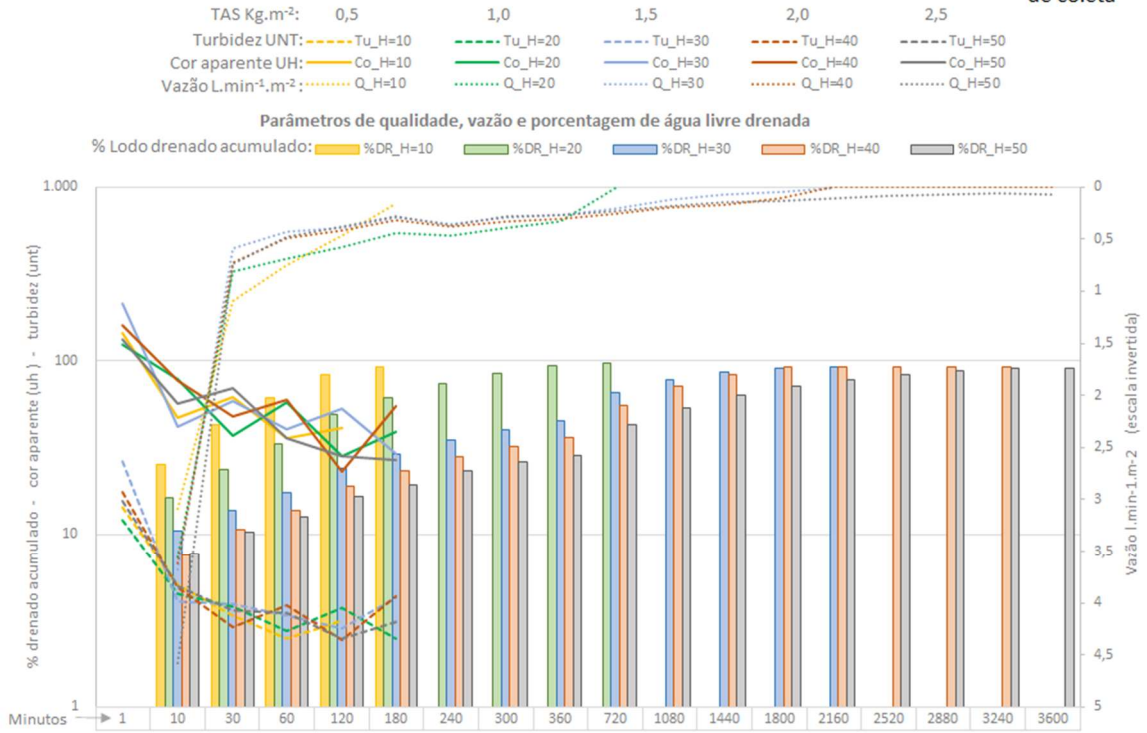
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 4

Ensaio %ST=0,5 - geotêxtil 300g.m² NT

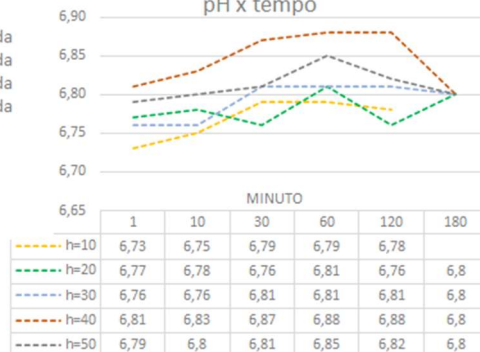
Lodo 1^o Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - Tu = Turbidez (UNT)
 - Co = Cor aparente (UH)
 - Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 - ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

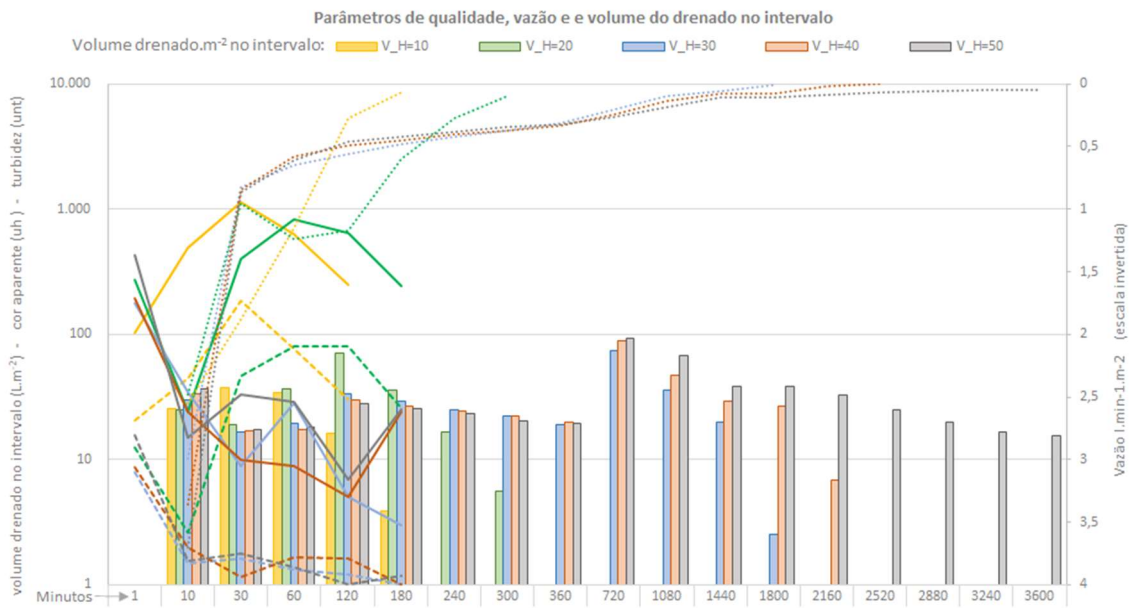
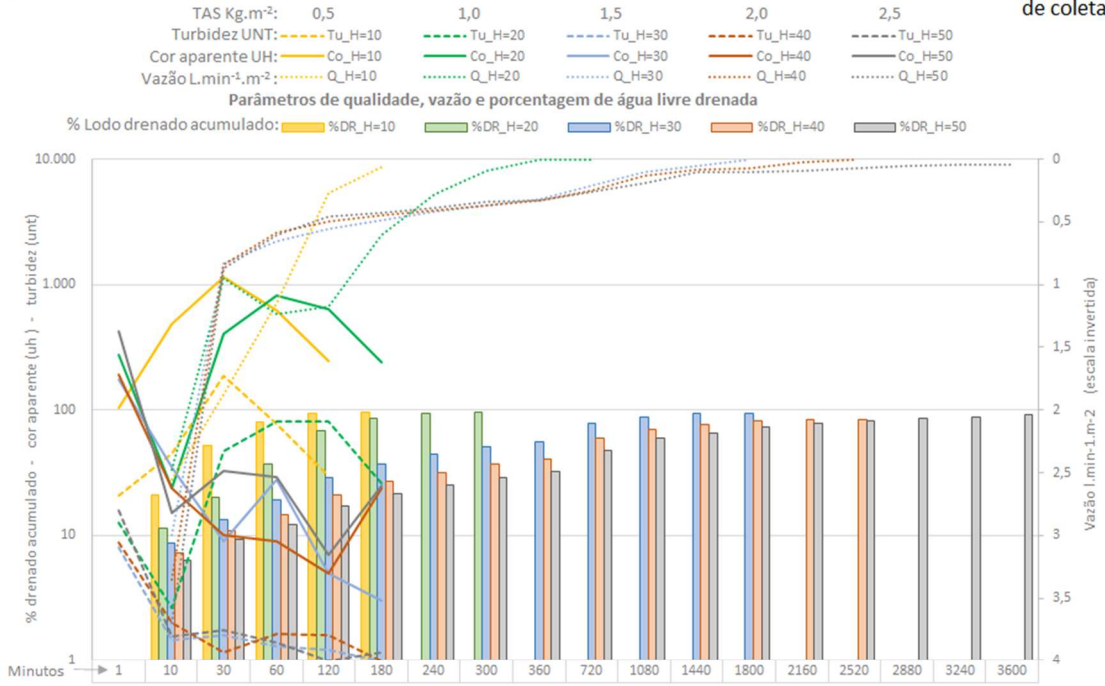
pH x tempo



Ensaio 5

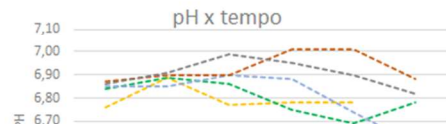
Ensaio %ST=0,5 - geotêxtil 55/55 UV

Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

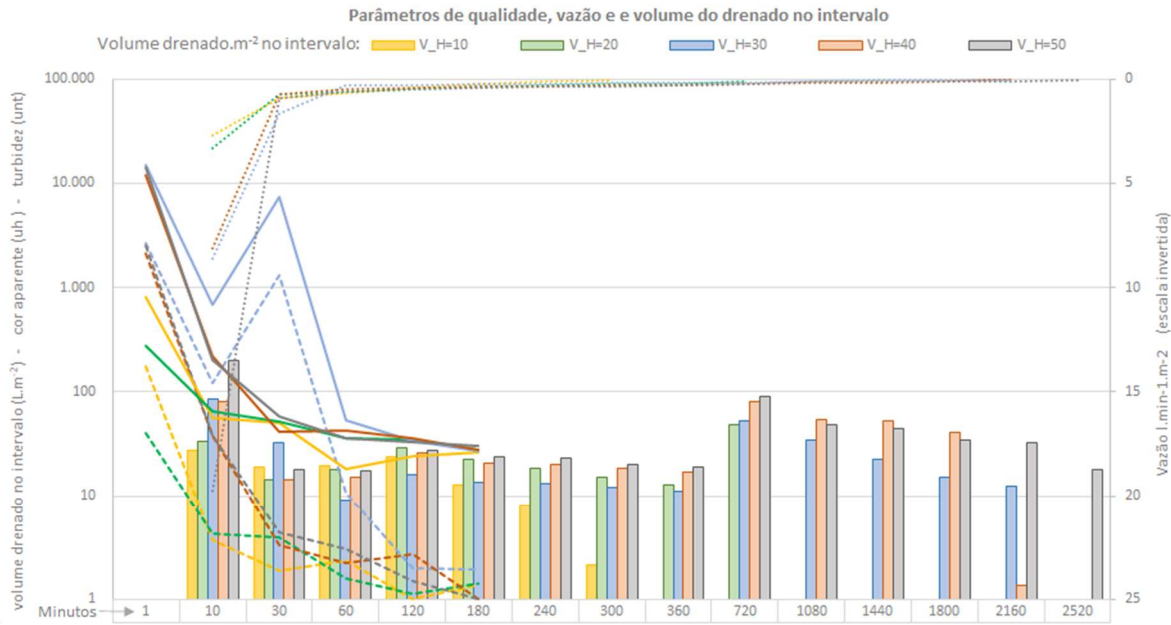
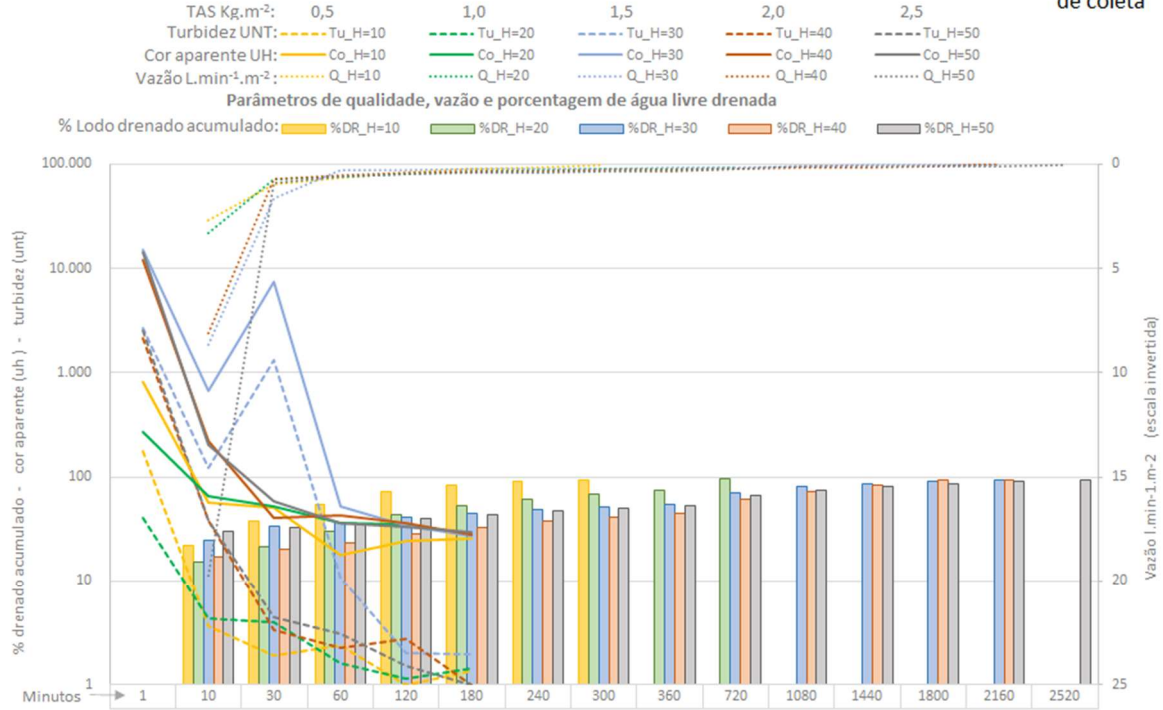


	MINUTO					
	1	10	30	60	120	180
h=10	6,76	6,89	6,77	6,78	6,78	
h=20	6,84	6,89	6,86	6,75	6,69	6,78
h=30	6,85	6,85	6,9	6,88	6,74	6,6
h=40	6,87	6,9	6,9	7,01	7,01	6,88
h=50	6,86	6,91	6,99	6,95	6,9	6,82

Ensaio 6

Ensaio %ST=0,5 - geotêxtil 105/105 DW

Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

%DR = % Lodo drenado acumulado
 Tu = Turbidez (UNT)
 Co = Cor aparente (UH)
 Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 V = Voume drenado no intervalo (L.m²)
 H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m²)
 ST = % de solidos totais inicial

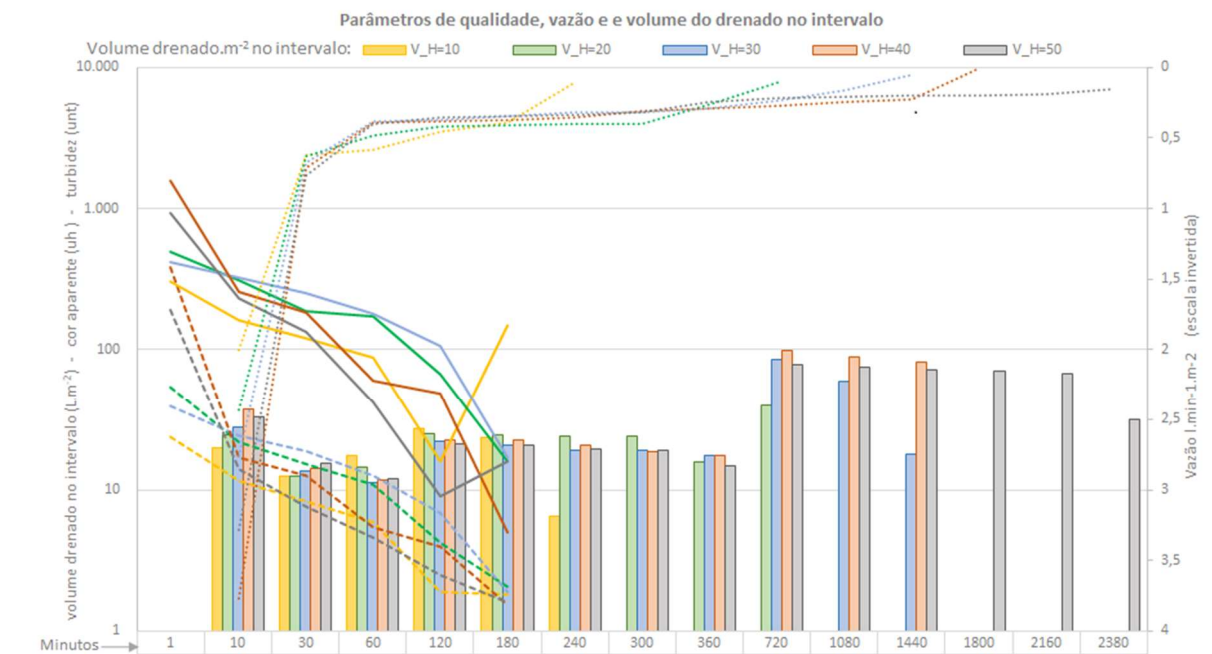
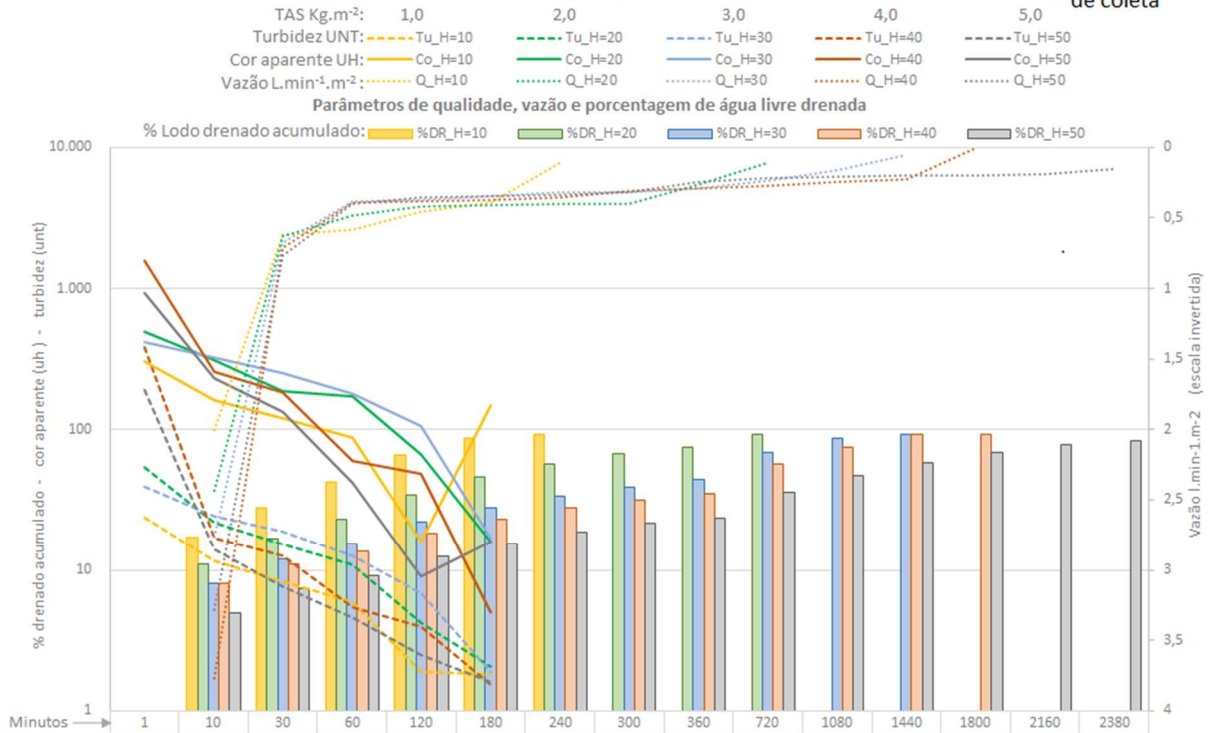
600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 7

Ensaio %ST=1,0 - geotêxtil 600g.m² NT

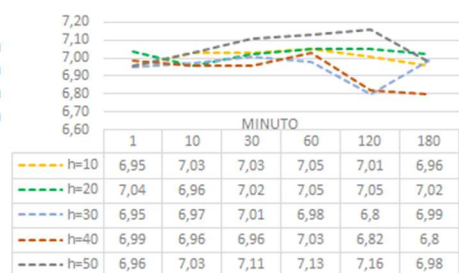
Lodo 1^o Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

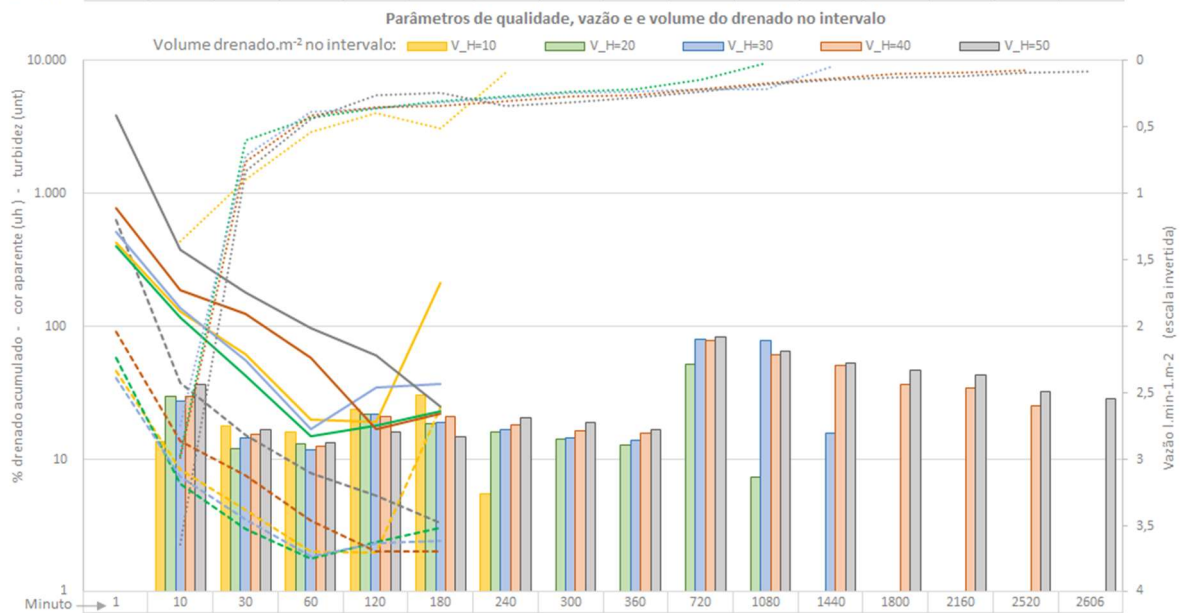
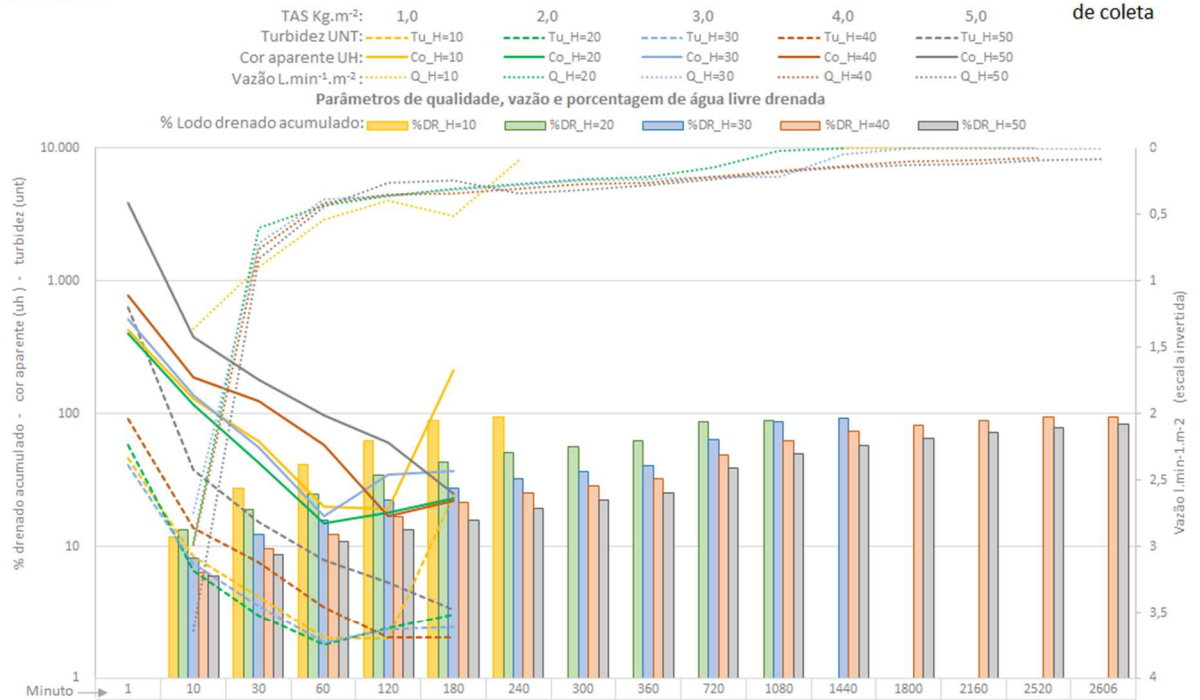
pH x tempo



Ensaio 8

Ensaio %ST=1,0 - geotêxtil 500g.m⁻² NT

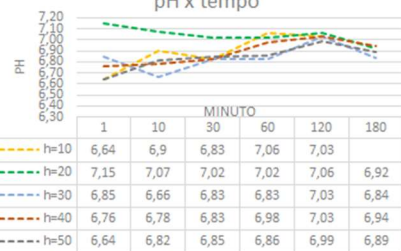
Lodo 1^o Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

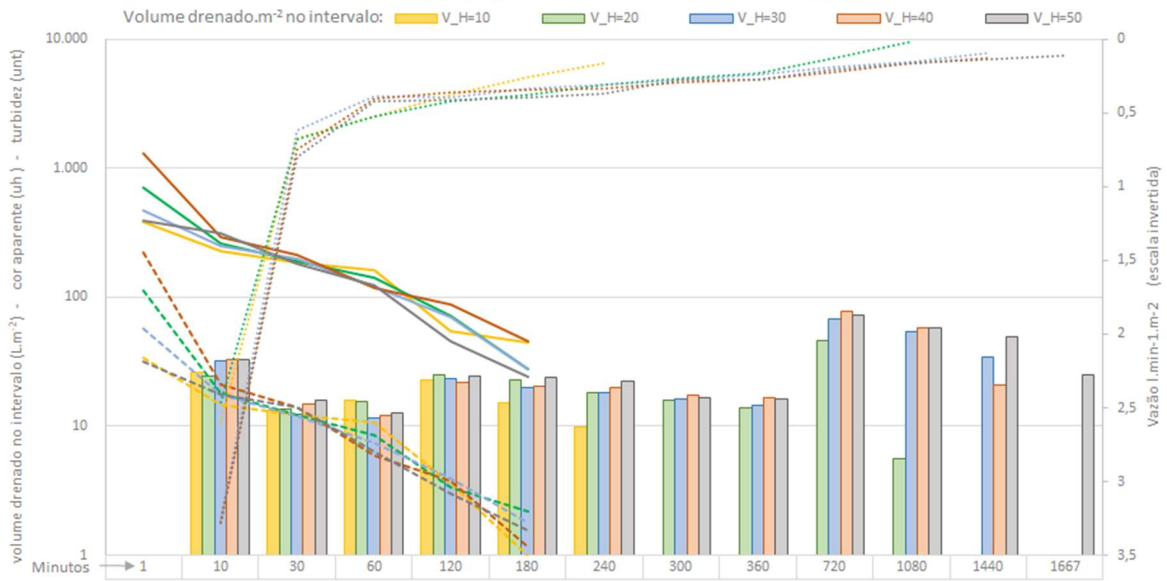
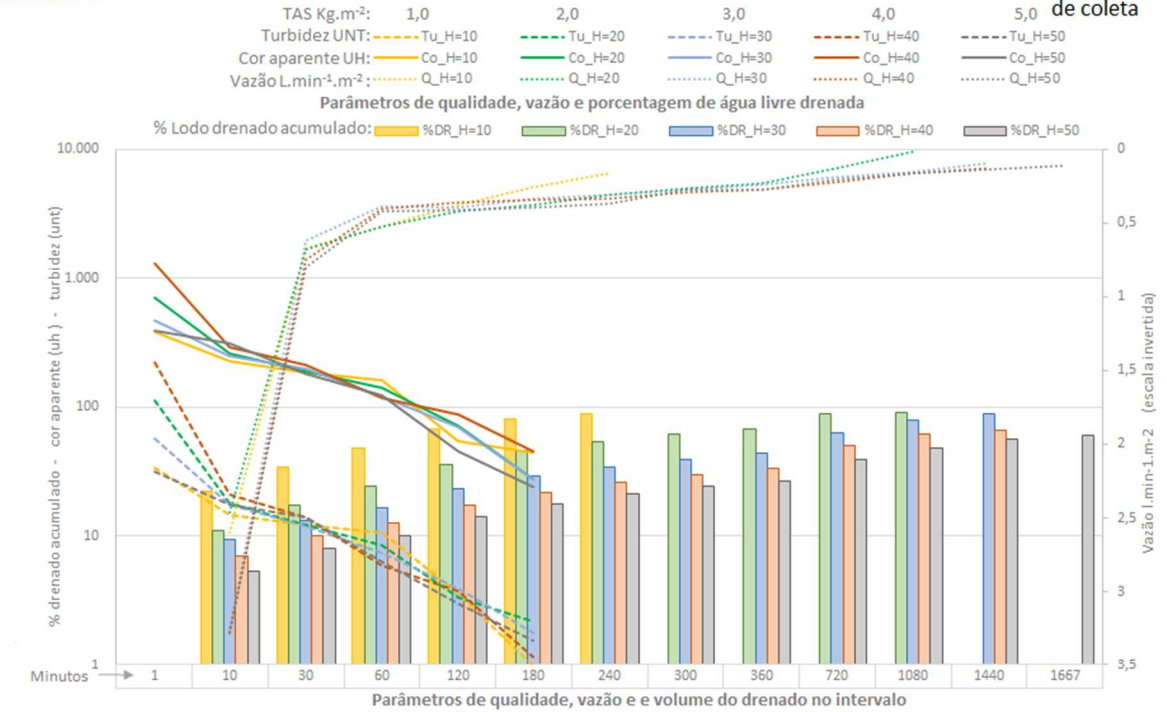
pH x tempo



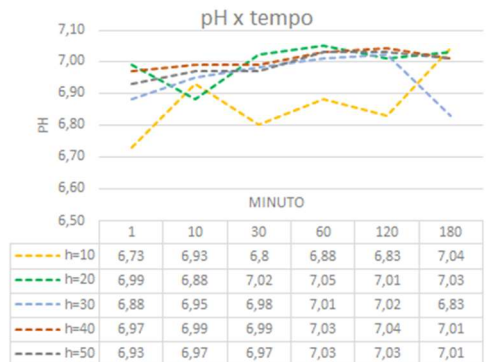
Ensaio 9

Ensaio %ST=1,0 - geotêxtil 400g.m⁻² NT

Lodo 1° Campanha de coleta



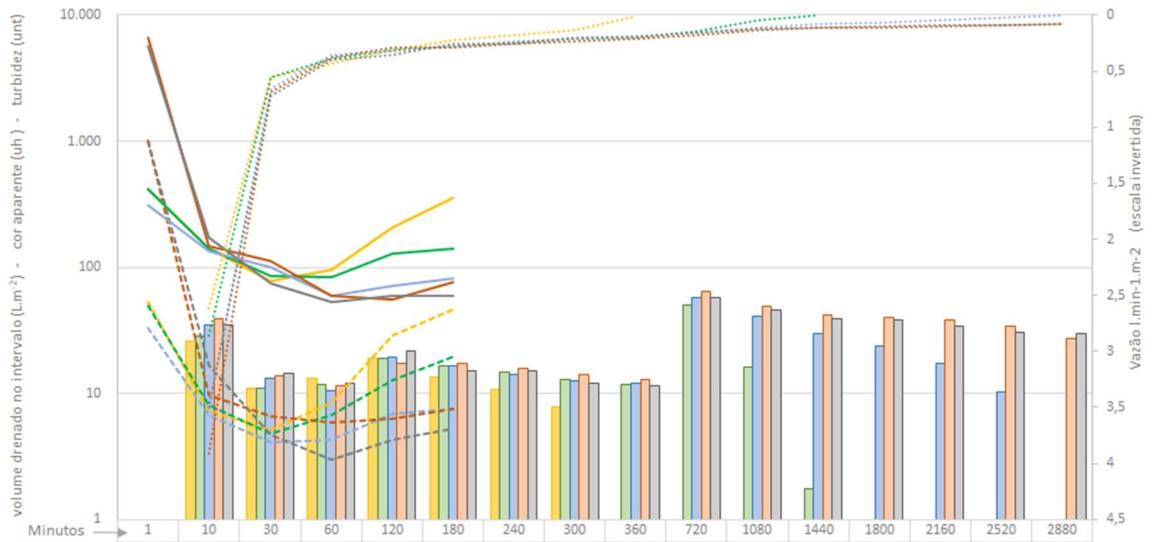
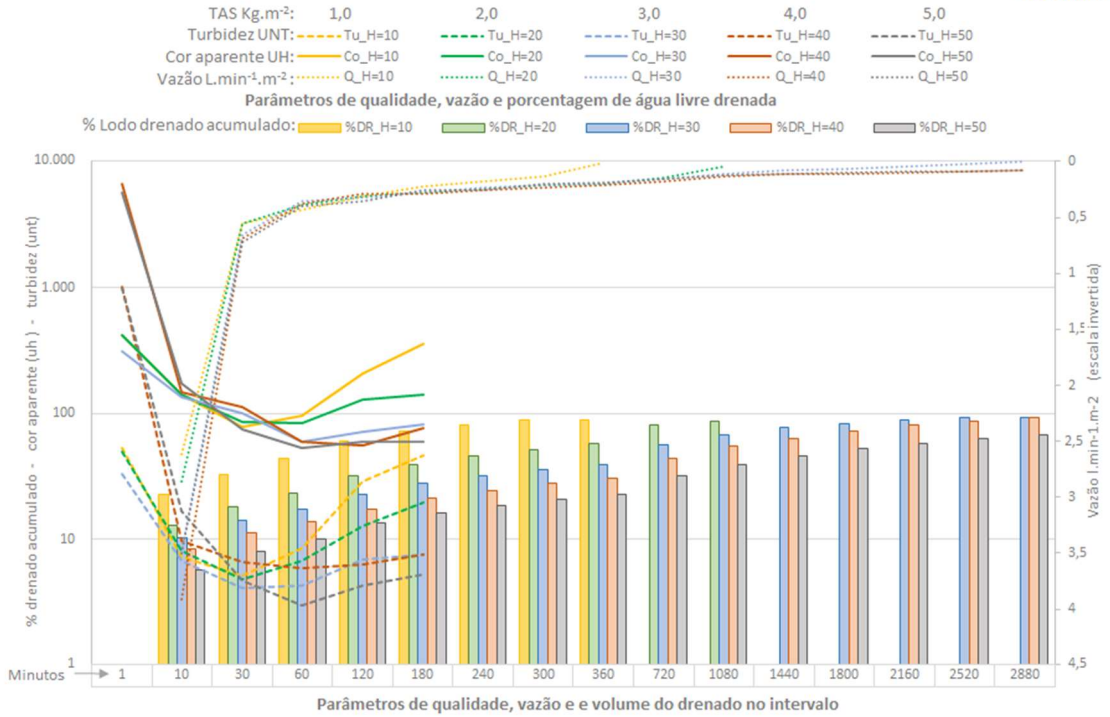
- Legenda Siglas:**
- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - Tu = Turbidez (UNT)
 - Co = Cor aparente (UH)
 - Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
 - ST = % de solidos totais inicial
 - 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 10

Ensaio %ST=1,0 - geotêxtil 300g.m² NT

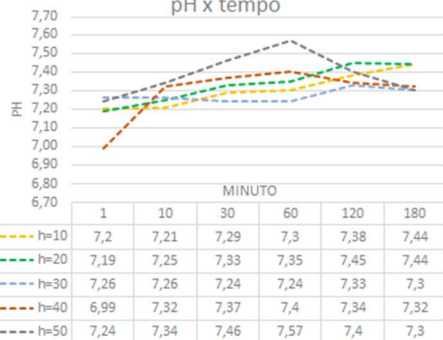
Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

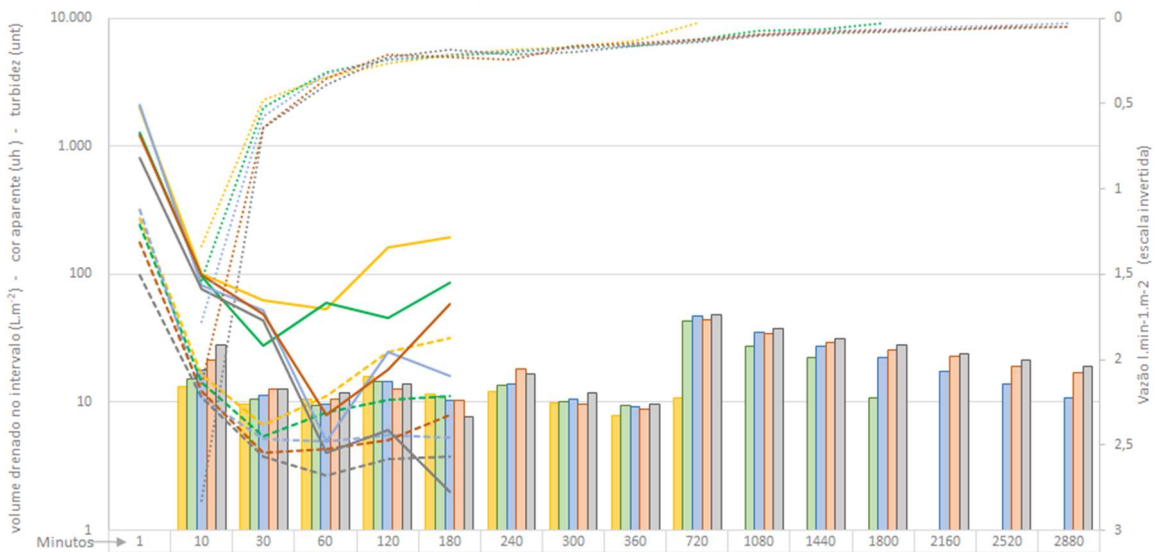
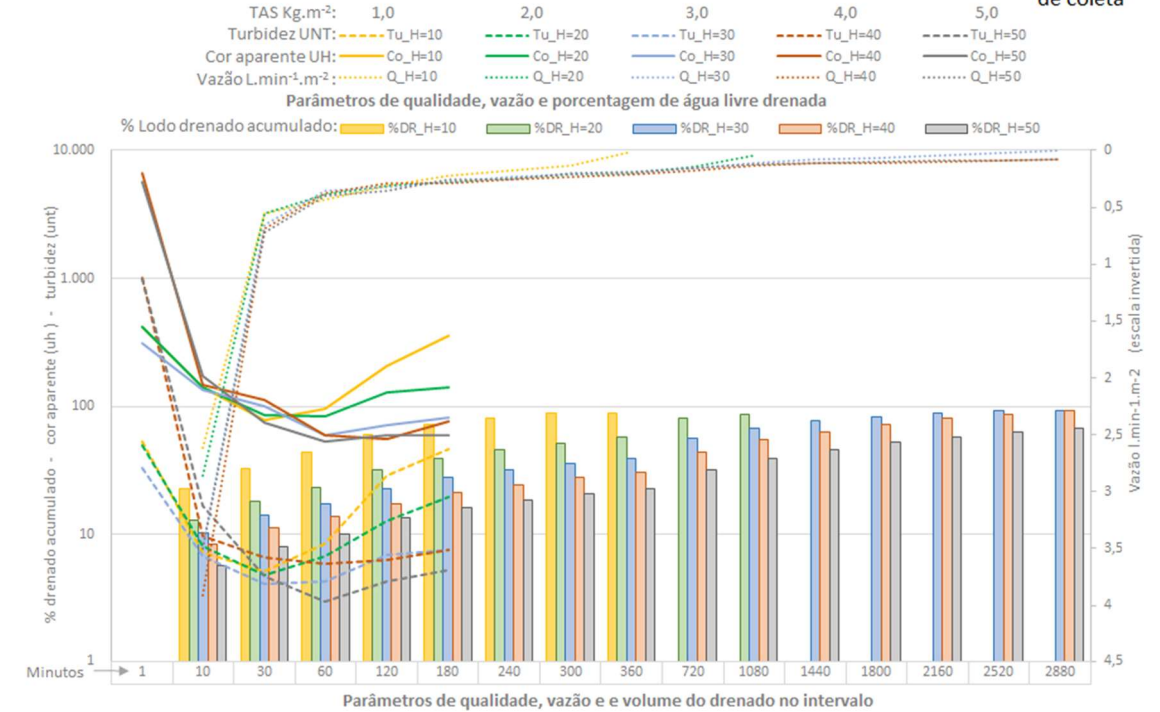
pH x tempo



Ensaio 11

Ensaio %ST=1,0 - geotêxtil 55/55 UV

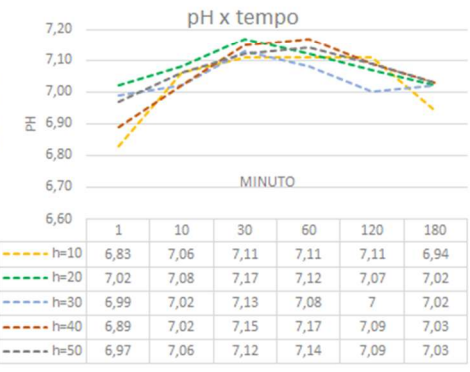
Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

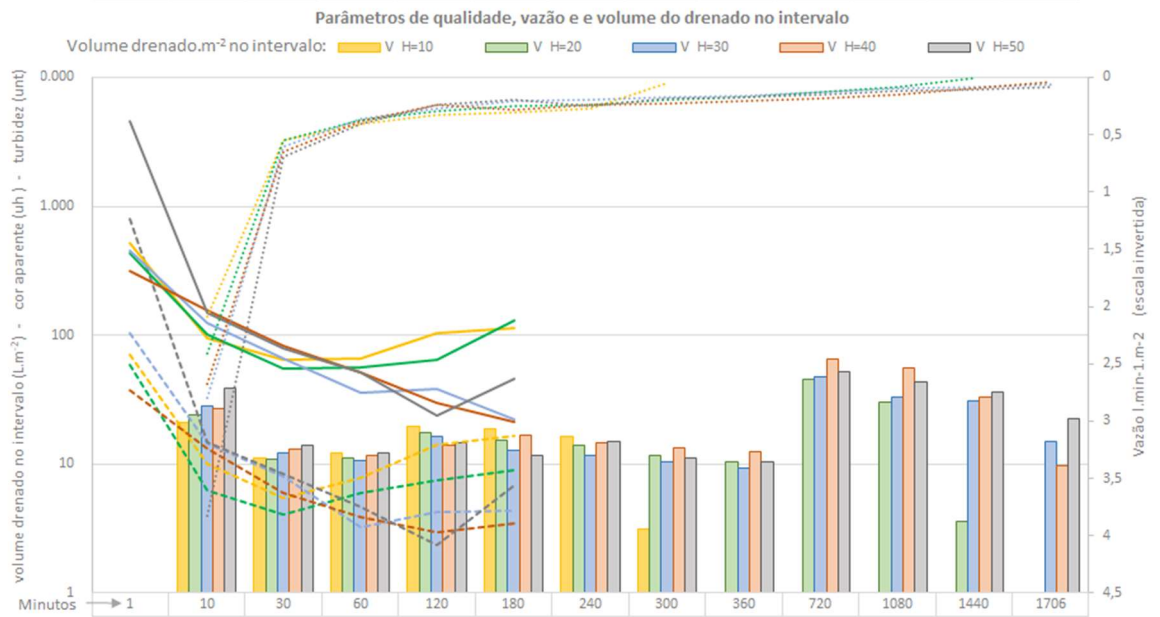
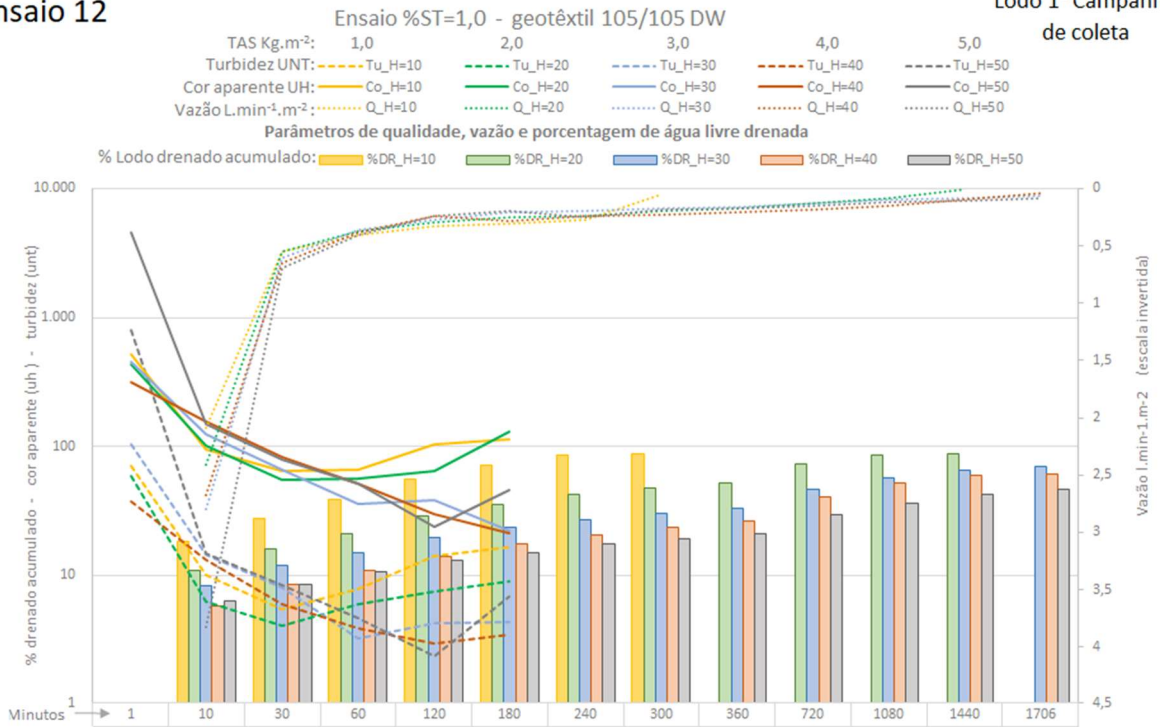
%DR = % Lodo drenado acumulado
 Tu = Turbidez (UNT)
 Co = Cor aparente (UH)
 Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
 ST = % de solidos totais inicial

600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



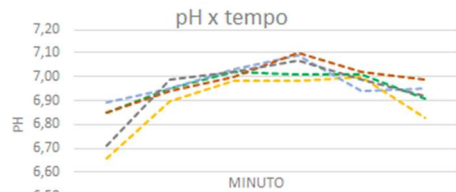
Ensaio 12

Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

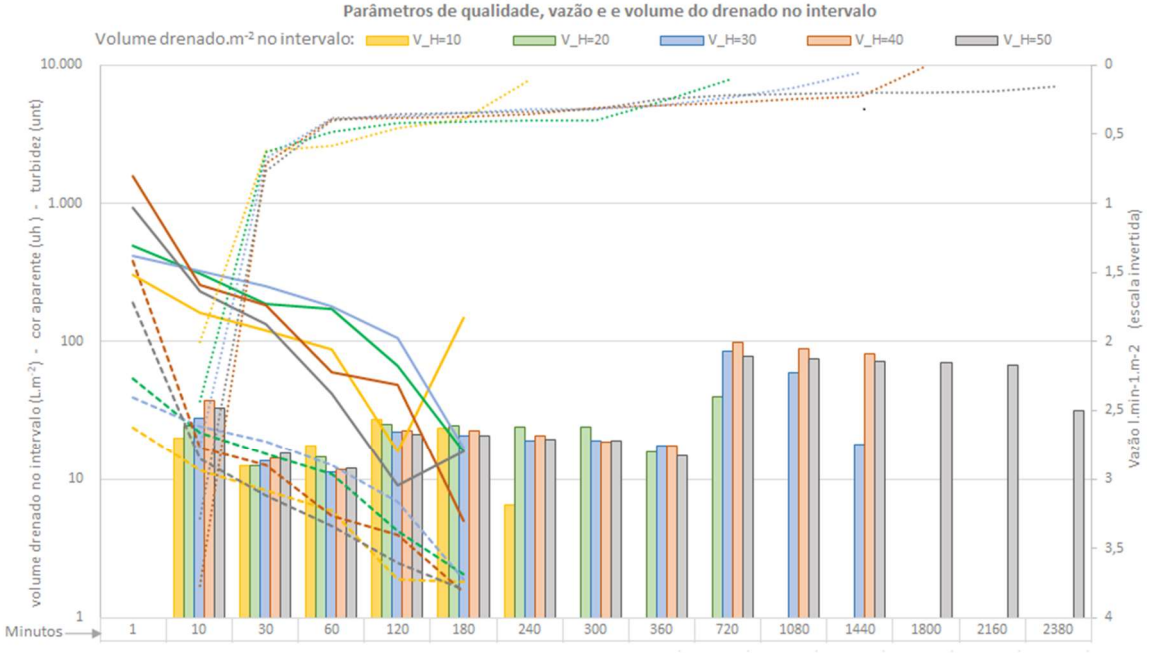
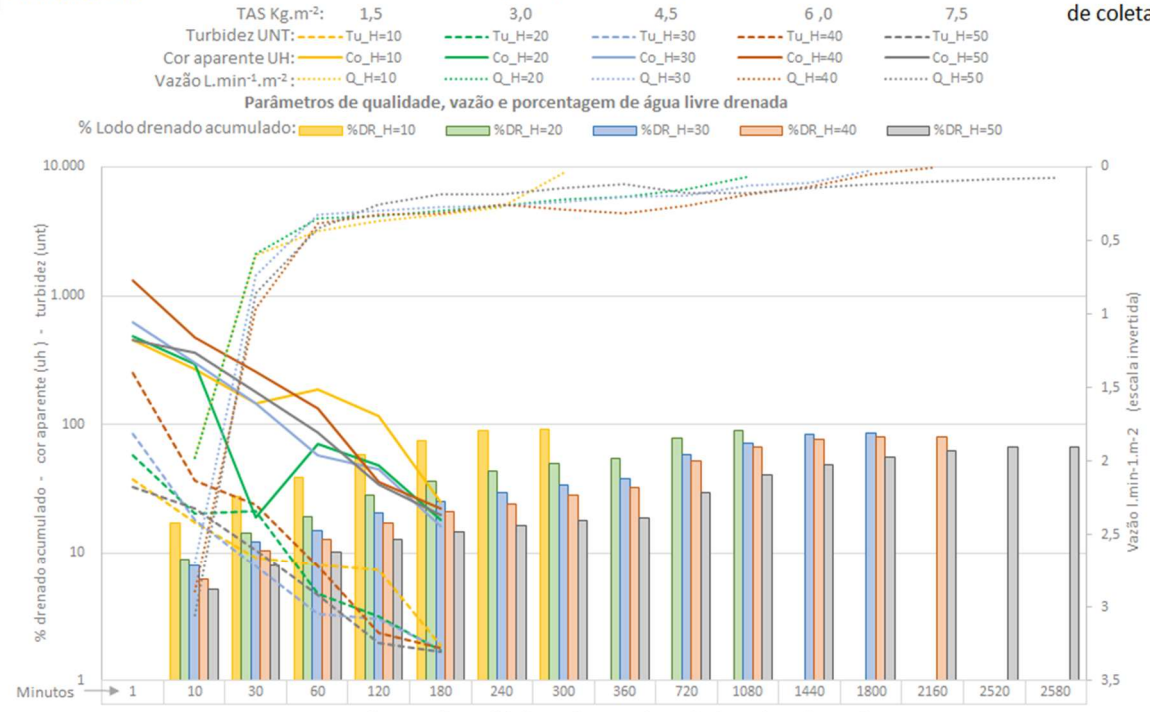


	1	10	30	60	120	180
h=10	6,66	6,9	6,98	6,98	7	6,83
h=20	6,85	6,95	7,02	7,01	7,01	6,91
h=30	6,89	6,95	7,03	7,09	6,94	6,95
h=40	6,85	6,94	7	7,1	7,02	6,99
h=50	6,71	6,99	7,02	7,07	6,99	6,92

Ensaio 13

Ensaio %ST=1,5 - geotêxtil 600g.m⁻² NT

Lodo 1^o Campanha de coleta



Legenda Siglas:

%DR = % Lodo drenado acumulado
 Tu = Turbidez (UNT)
 Co = Cor aparente (UH)
 Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
 ST = % de solidos totais inicial

600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

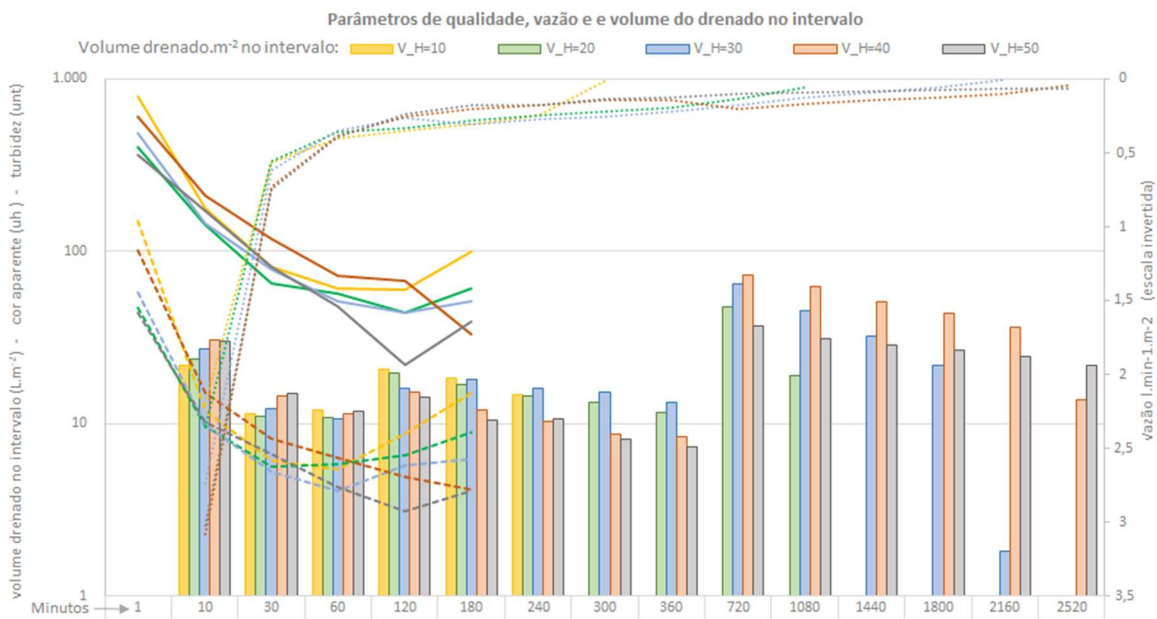
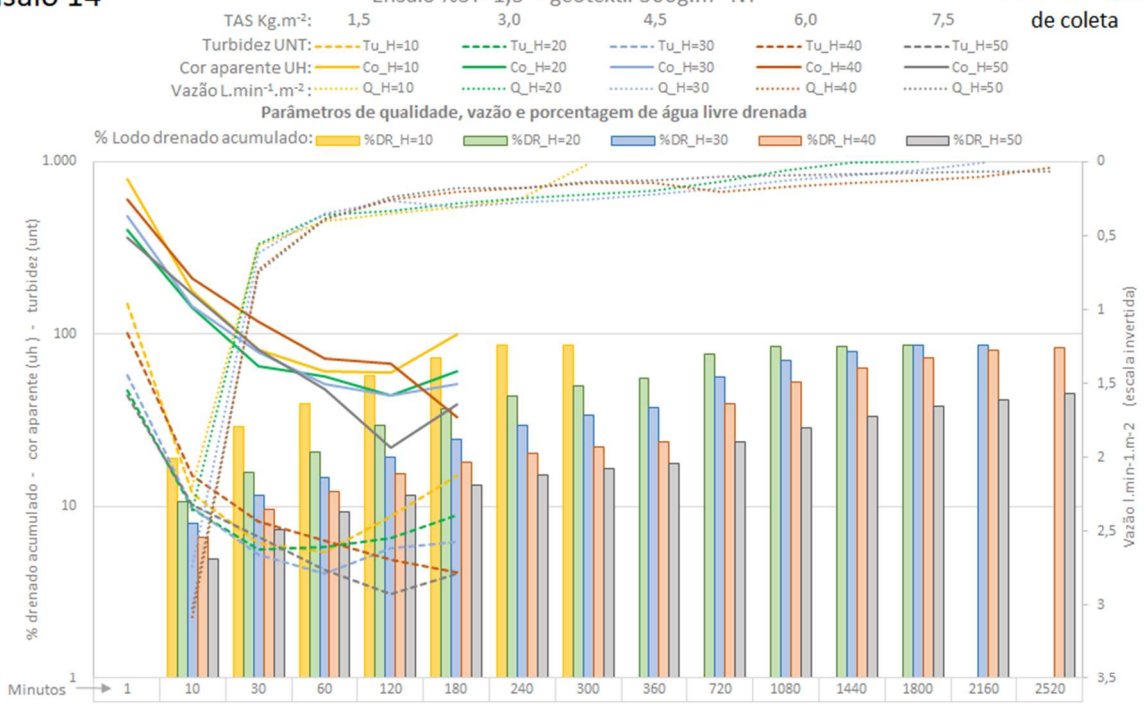


	1	10	30	60	120	180
h=10	6,74	6,84	6,89	6,95	6,93	6,99
h=20	6,8	6,88	6,99	6,99	7,07	7,01
h=30	6,8	6,83	6,88	7,06	7	6,98
h=40	6,97	6,89	6,96	6,99	7,05	7,14
h=50	6,86	6,92	6,98	6,99	7,04	7,14

Ensaio 14

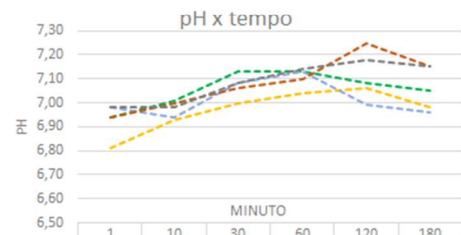
Ensaio %ST=1,5 - geotêxtil 500g.m⁻² NT

Lodo 1ª Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

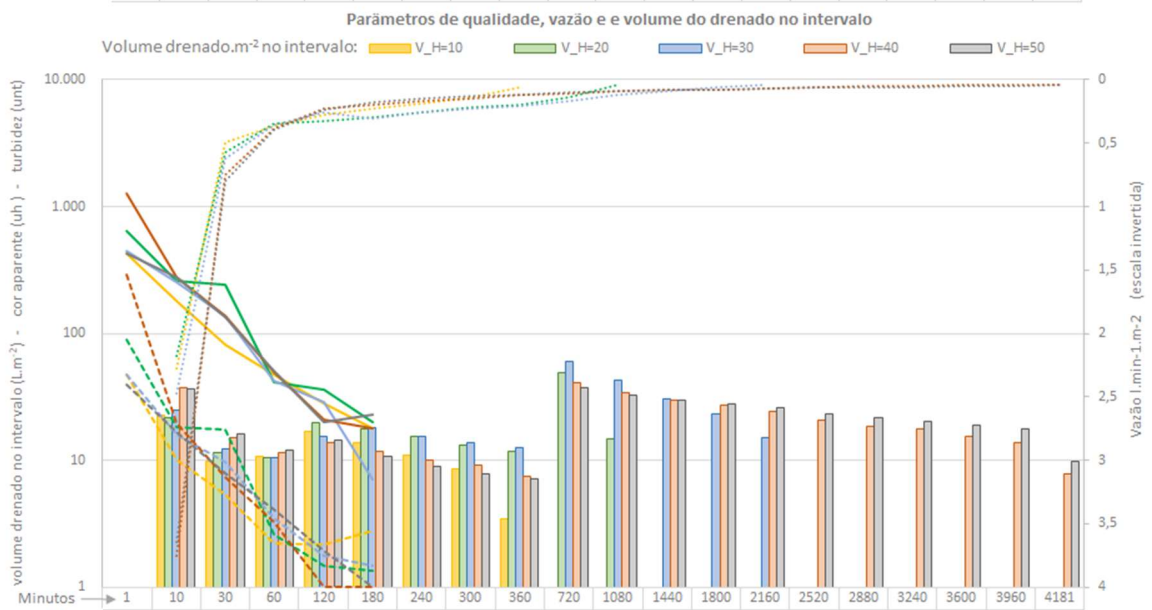
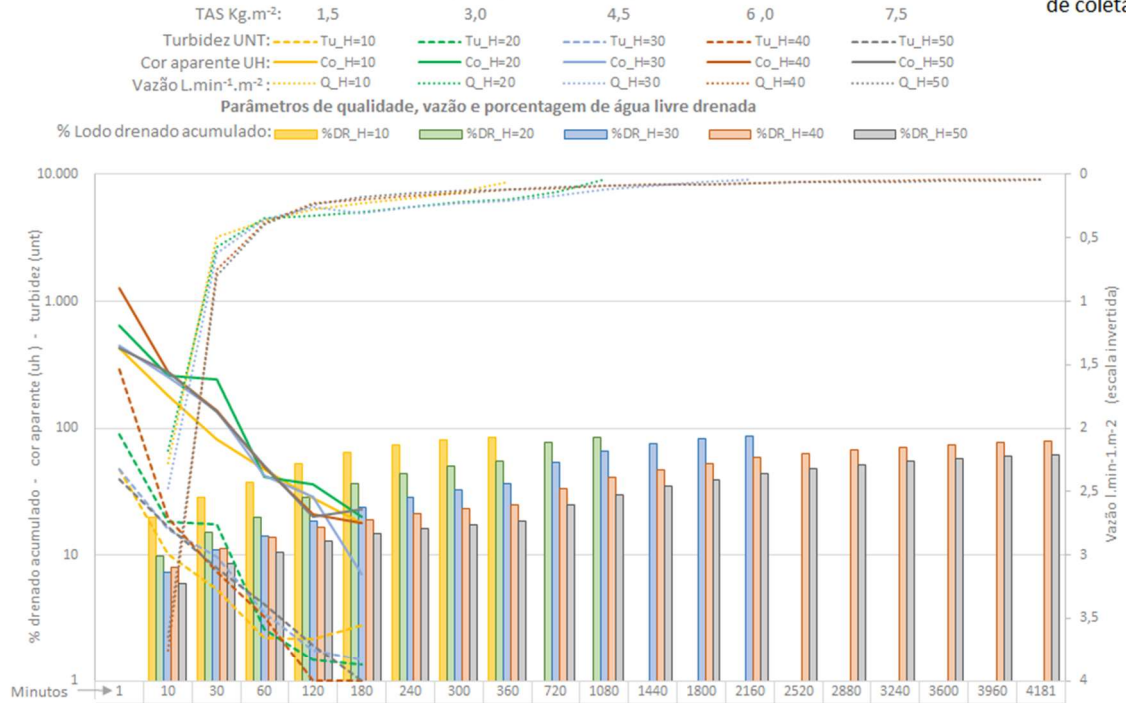


	1	10	30	60	120	180
h=10	6,81	6,93	7	7,04	7,06	6,98
h=20	6,94	7,01	7,13	7,13	7,08	7,05
h=30	6,98	6,94	7,08	7,13	6,99	6,96
h=40	6,94	7	7,06	7,1	7,25	7,15
h=50	6,98	6,98	7,08	7,14	7,18	7,15

Ensaio 15

Ensaio %ST=1,5 - geotêxtil 400g.m⁻² NT

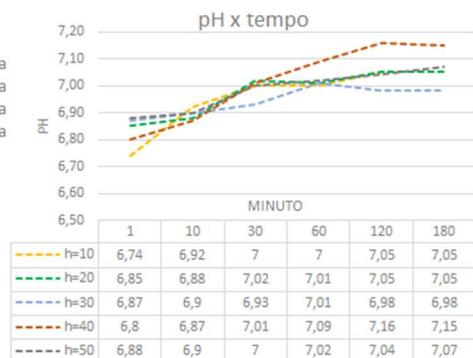
Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

%DR = % Lodo drenado acumulado
 Tu = Turbidez (UNT)
 Co = Cor aparente (UH)
 Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
 ST = % de solidos totais inicial

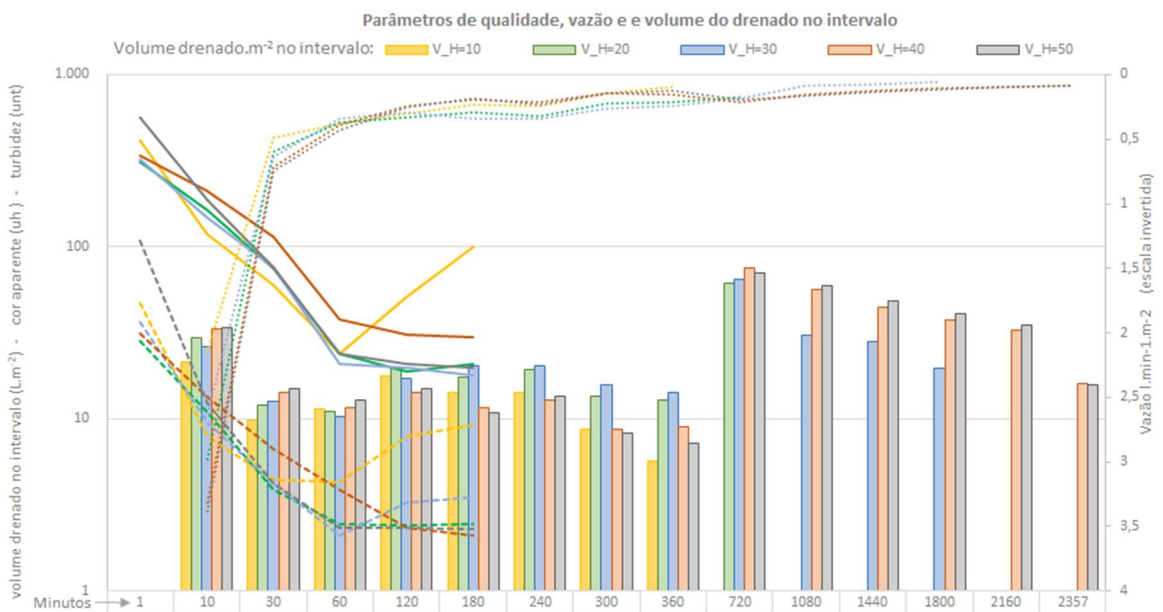
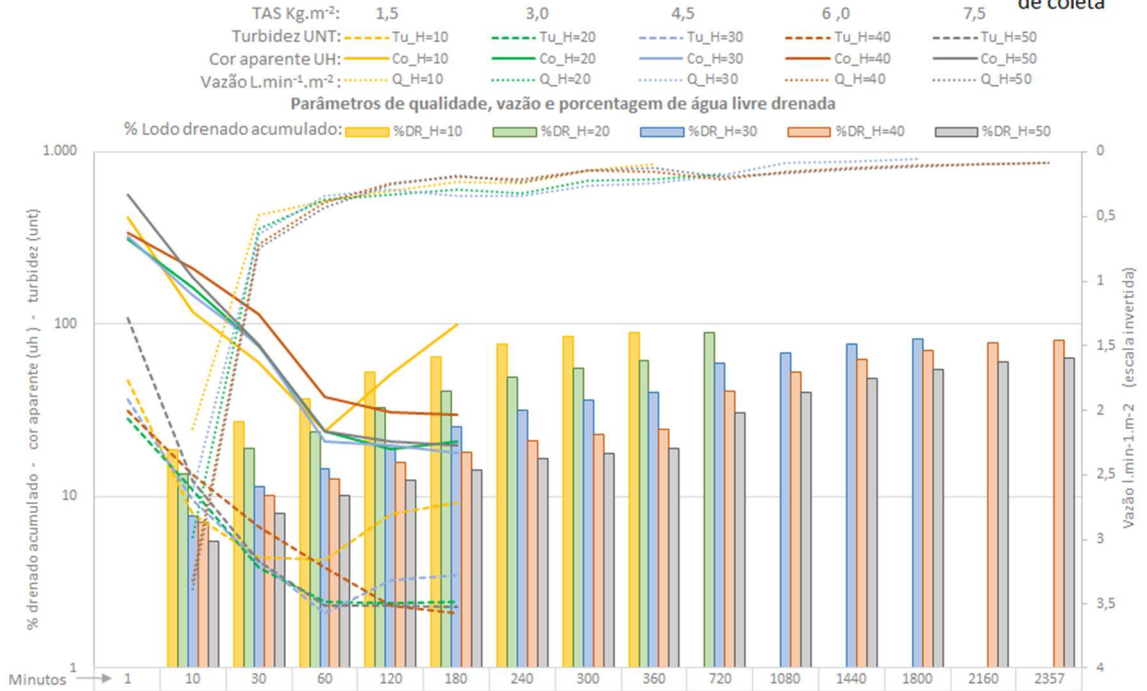
600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 16

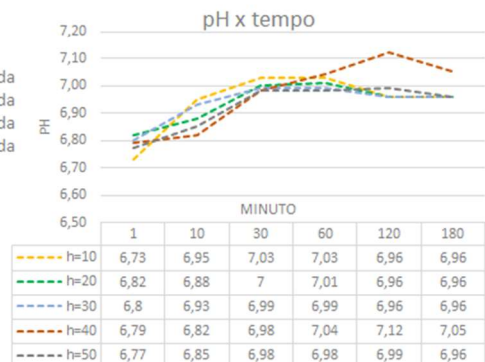
Ensaio %ST=1,5 - geotêxtil 300g.m⁻² NT

Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

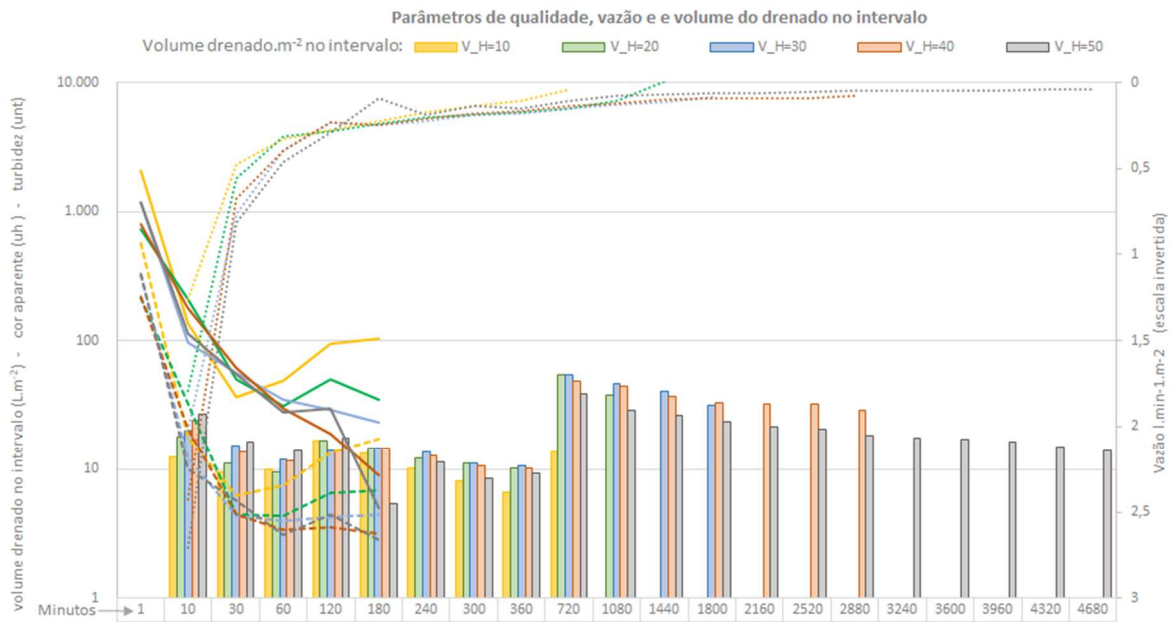
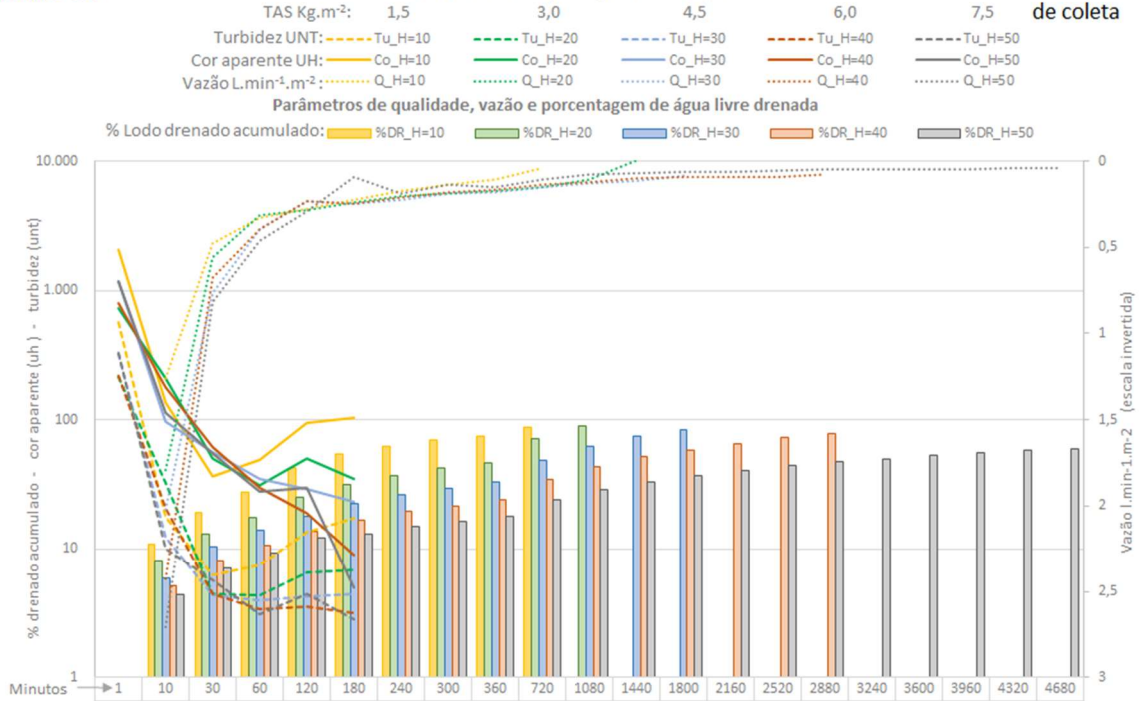
%DR = % Lodo drenado acumulado 600 = Geotêxtil de 600g.m² não tecida
 Tu = Turbidez (UNT) 500 = Geotêxtil de 500g.m² não tecida
 Co = Cor aparente (UH) 400 = Geotêxtil de 400g.m² não tecida
 Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²) 300 = Geotêxtil de 300g.m² não tecida
 V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²) 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm) 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida
 Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
 ST = % de solidos totais inicial



Ensaio 17

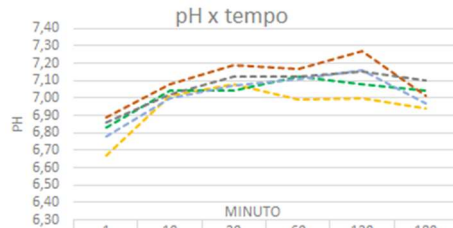
Ensaio %ST=1,5 - geotêxtil 55/55 UV

Lodo 1ª Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

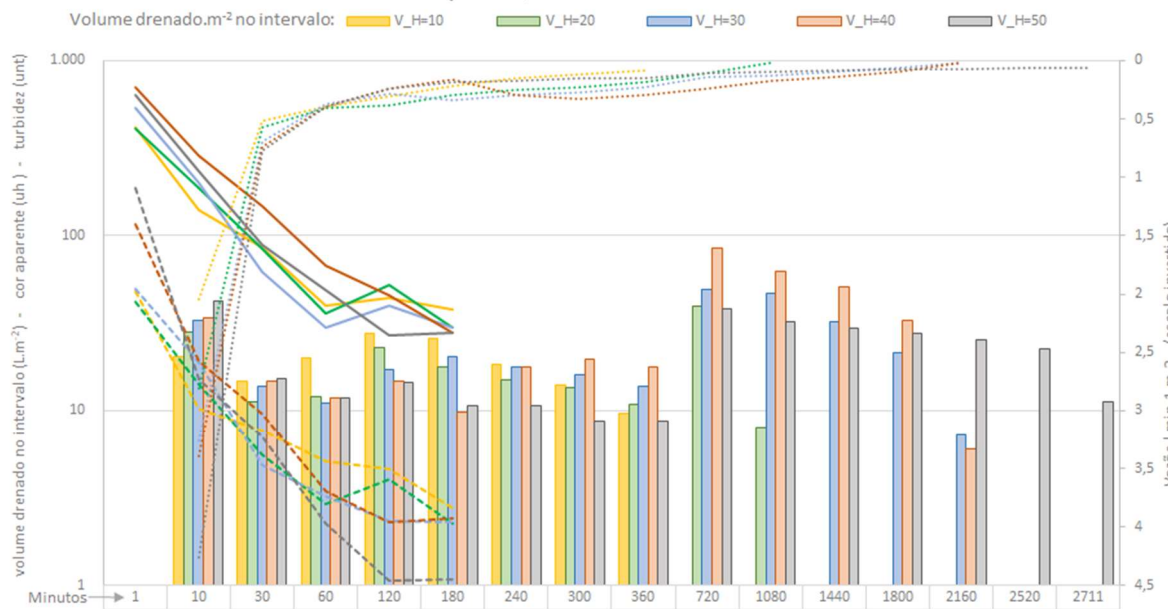
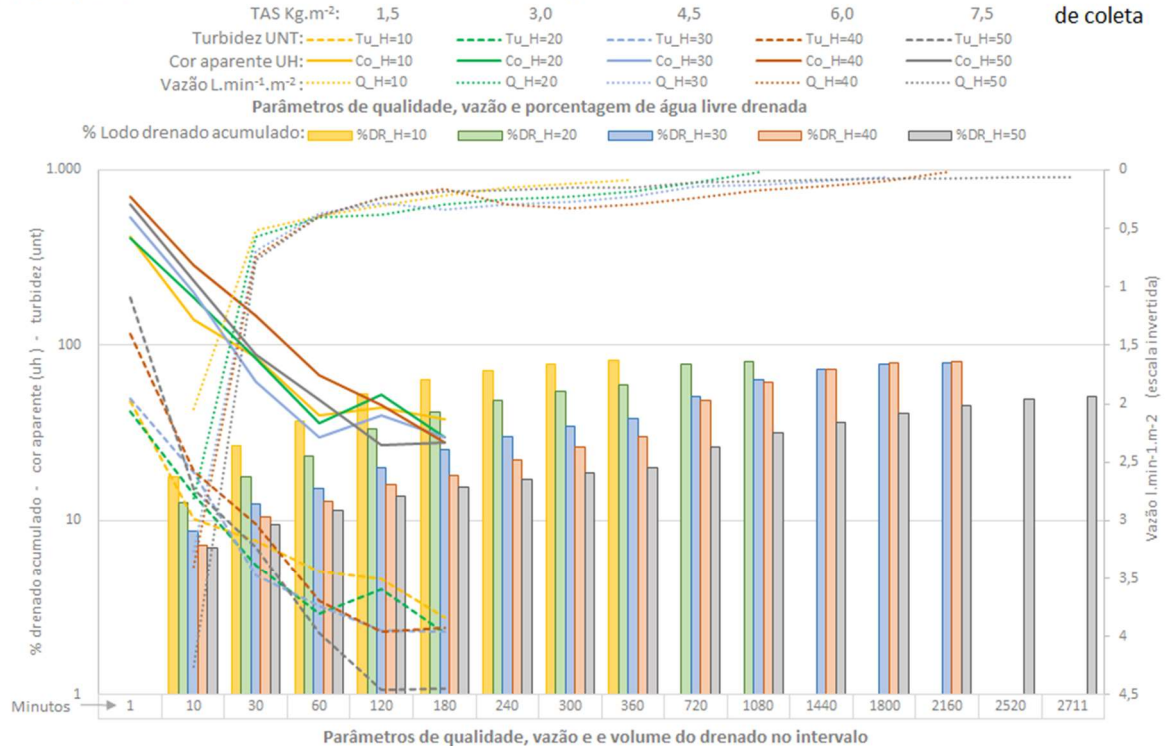


	MINUTO					
	1	10	30	60	120	180
h=10	6,67	7,01	7,08	6,99	7	6,94
h=20	6,83	7,04	7,04	7,12	7,08	7,04
h=30	6,78	7	7,07	7,11	7,16	6,97
h=40	6,89	7,08	7,19	7,17	7,27	7,01
h=50	6,86	7,02	7,12	7,12	7,15	7,1

Ensaio 18

Ensaio %ST=1,5 - geotêxtil 105/105 DW

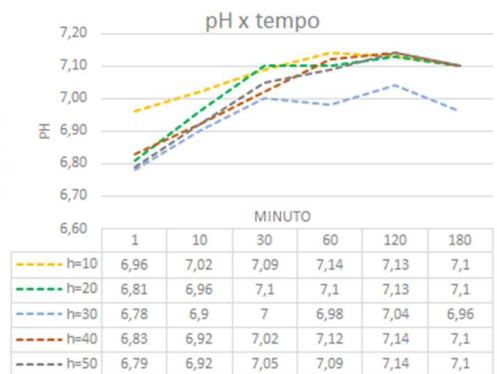
Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

%DR = % Lodo drenado acumulado
 Tu = Turbidez (UNT)
 Co = Cor aparente (UH)
 Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
 ST = % de solidos totais inicial

600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 19

Ensaio %ST=2,0 - geotêxtil 600g.m⁻² NT

Lodo 1° Campanha de coleta

TAS Kg.m⁻²: 2,0 4,0 6,0 8,0 10,0

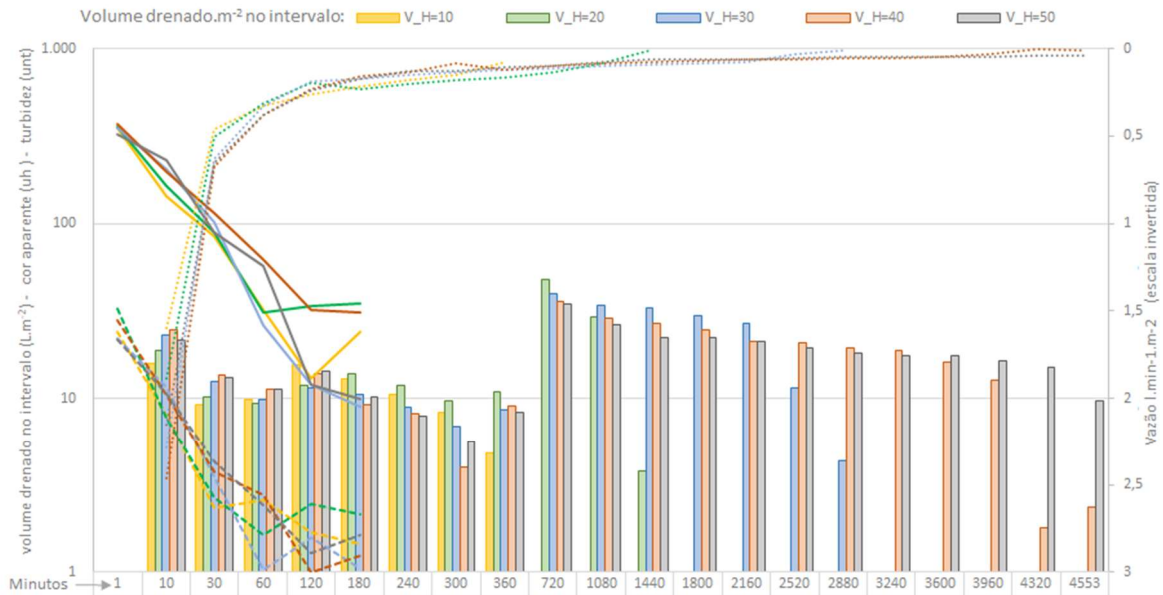
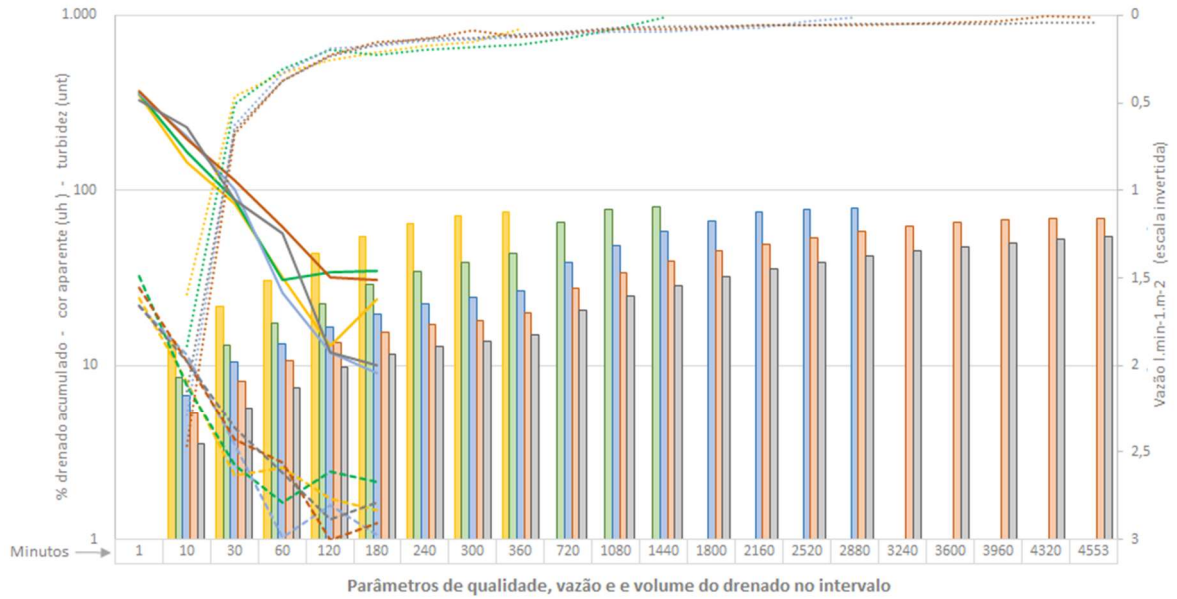
Turbidez UNT: Tu_H=10 Tu_H=20 Tu_H=30 Tu_H=40 Tu_H=50

Cor aparente UH: Co_H=10 Co_H=20 Co_H=30 Co_H=40 Co_H=50

Vazão L.min⁻¹.m⁻²: Q_H=10 Q_H=20 Q_H=30 Q_H=40 Q_H=50

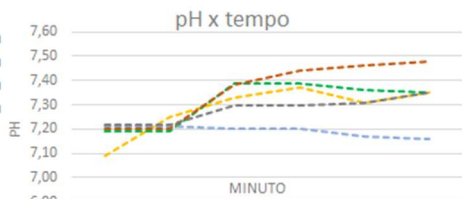
Parâmetros de qualidade, vazão e porcentagem de água livre drenada

% Lodo drenado acumulado: %DR_H=10 %DR_H=20 %DR_H=30 %DR_H=40 %DR_H=50



Legenda Siglas:

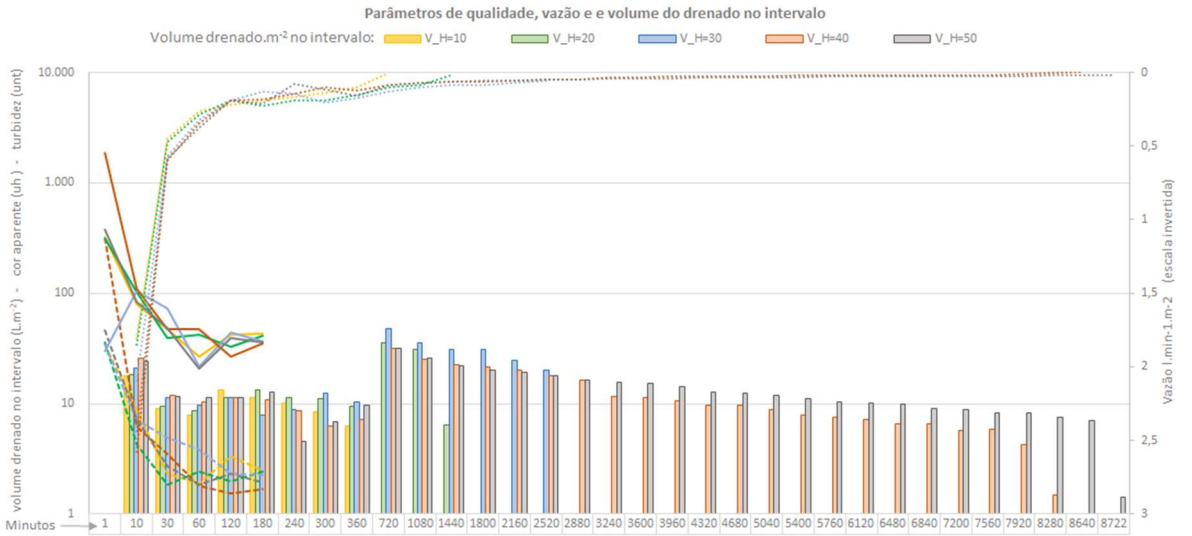
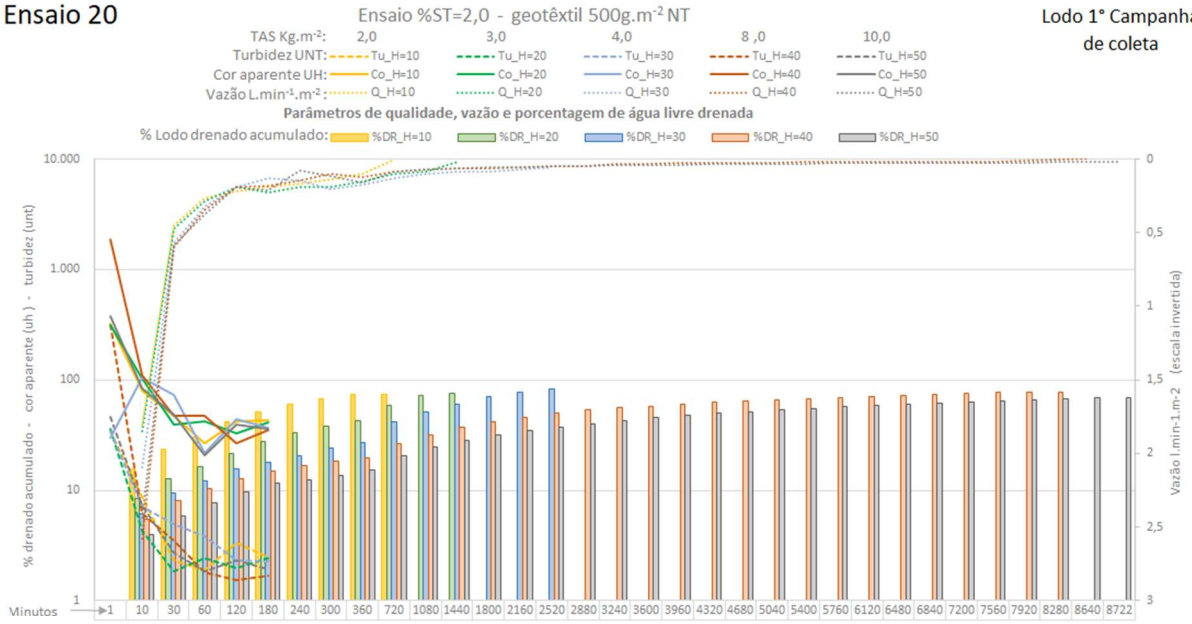
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecido
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecido
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecido
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecido
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecido
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecido



	1	10	30	60	120	180
h=10	7,09	7,25	7,33	7,37	7,31	7,35
h=20	7,19	7,19	7,39	7,39	7,36	7,35
h=30	7,21	7,21	7,2	7,2	7,17	7,16
h=40	7,2	7,2	7,38	7,44	7,46	7,48
h=50	7,22	7,22	7,3	7,3	7,31	7,35

Ensaio 20

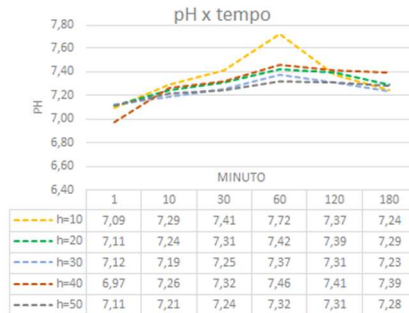
Lodo 1ª Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial

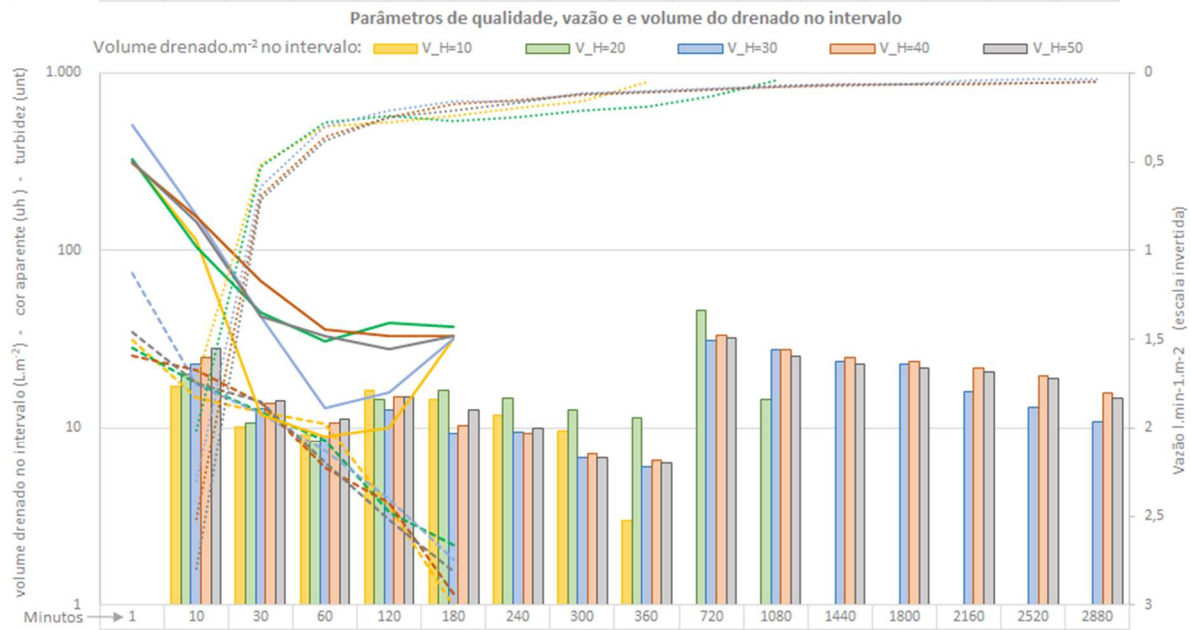
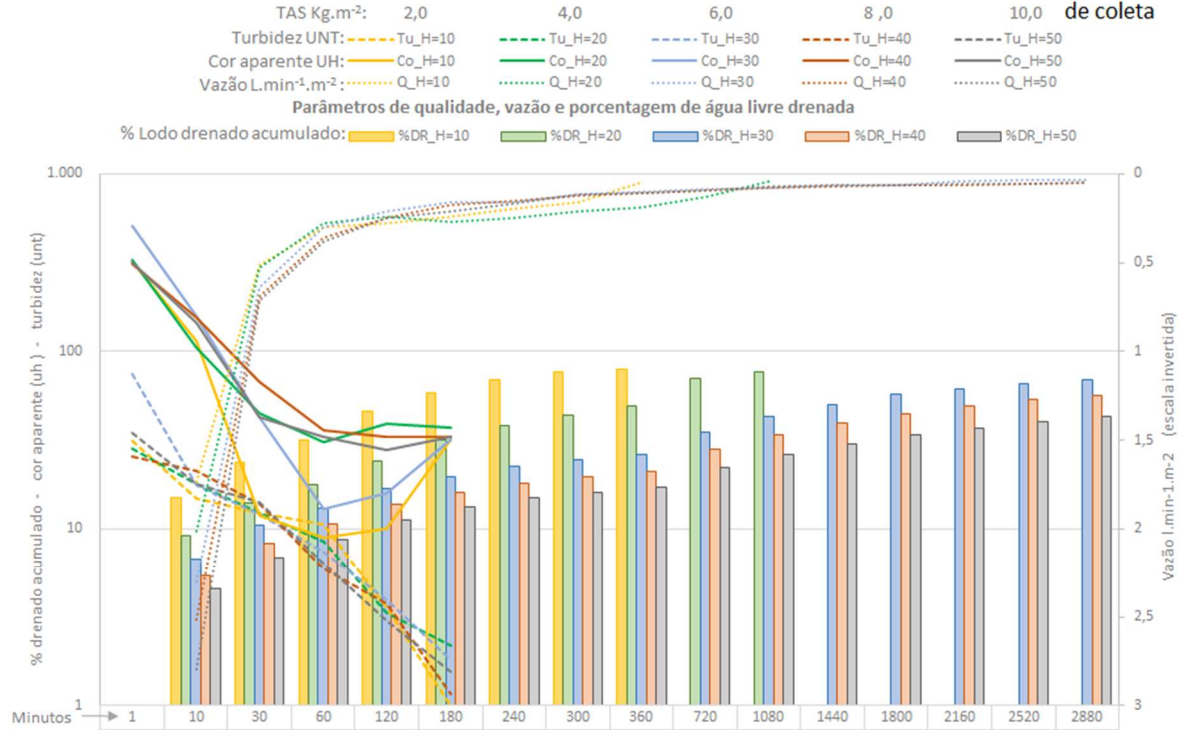
600 = Geotêxtil de 600g.m² não tecida
 500 = Geotêxtil de 500g.m² não tecida
 400 = Geotêxtil de 400g.m² não tecida
 300 = Geotêxtil de 300g.m² não tecida
 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 21

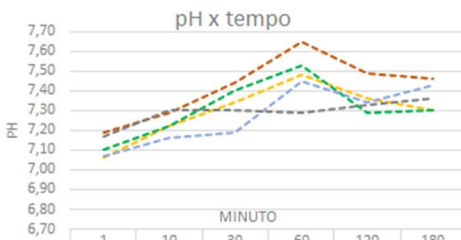
Ensaio %ST=2,0 - geotêxtil 400g.m⁻² NT

Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

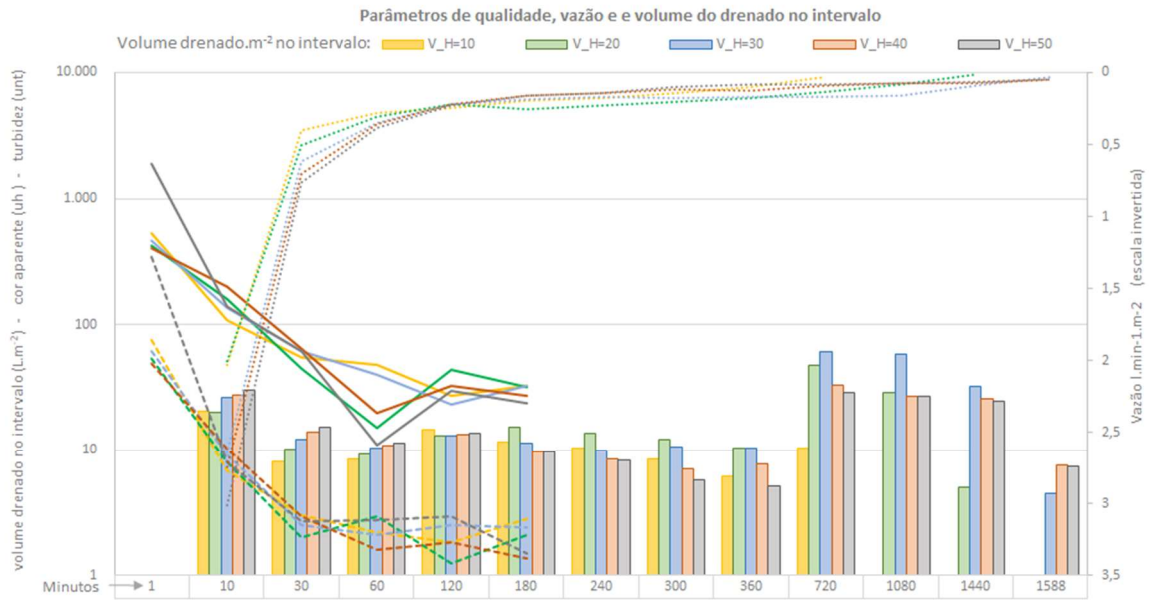
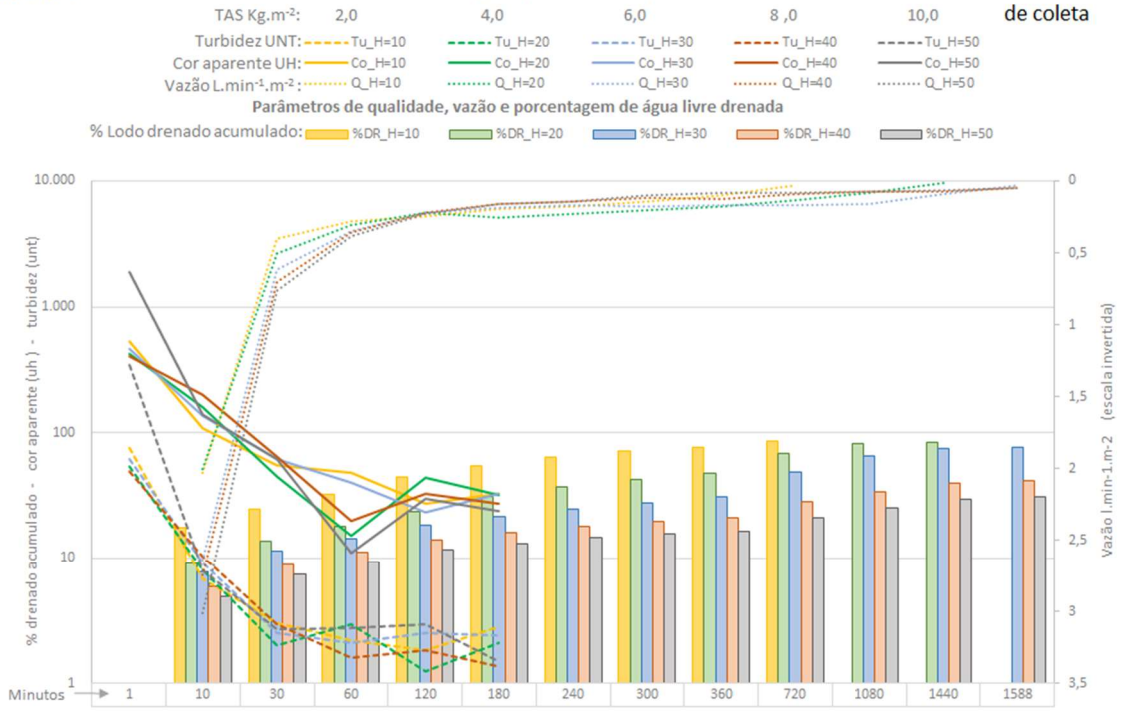


	1	10	30	60	120	180
h=10	7,06	7,22	7,34	7,48	7,36	7,3
h=20	7,1	7,22	7,4	7,53	7,29	7,3
h=30	7,07	7,16	7,19	7,45	7,34	7,43
h=40	7,19	7,29	7,44	7,65	7,49	7,46
h=50	7,17	7,3	7,3	7,29	7,33	7,36

Ensaio 22

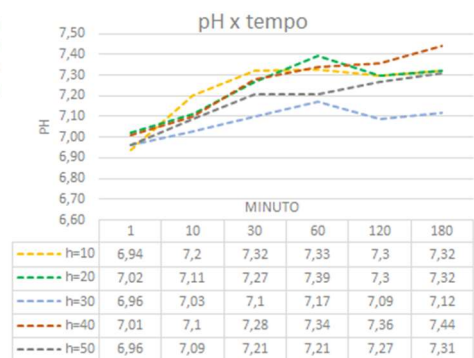
Ensaio %ST=2,0 - geotêxtil 300g.m⁻² NT

Lodo 1ª Campanha de coleta



Legenda Siglas:

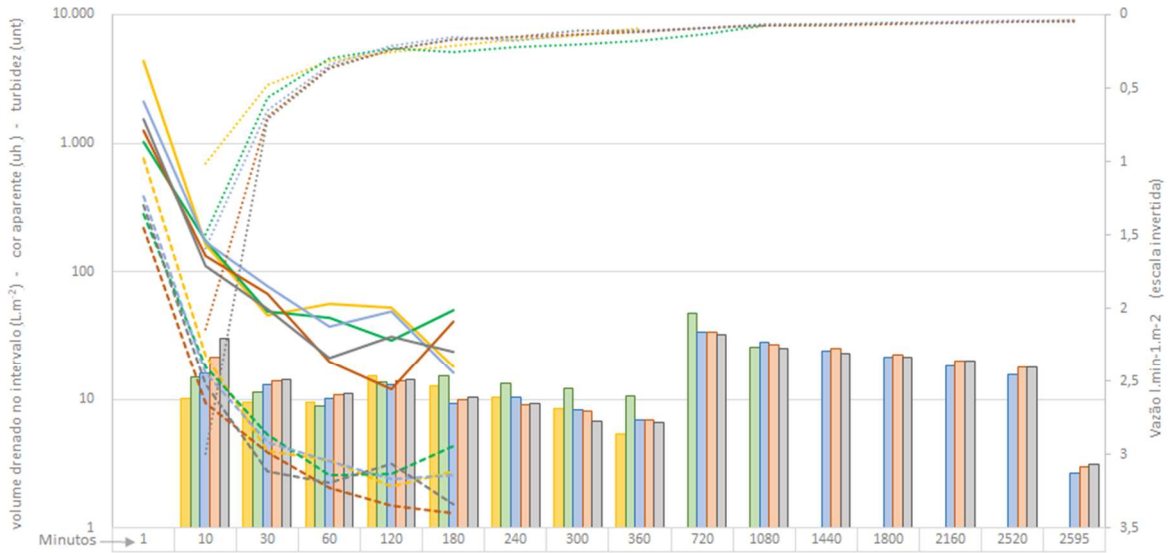
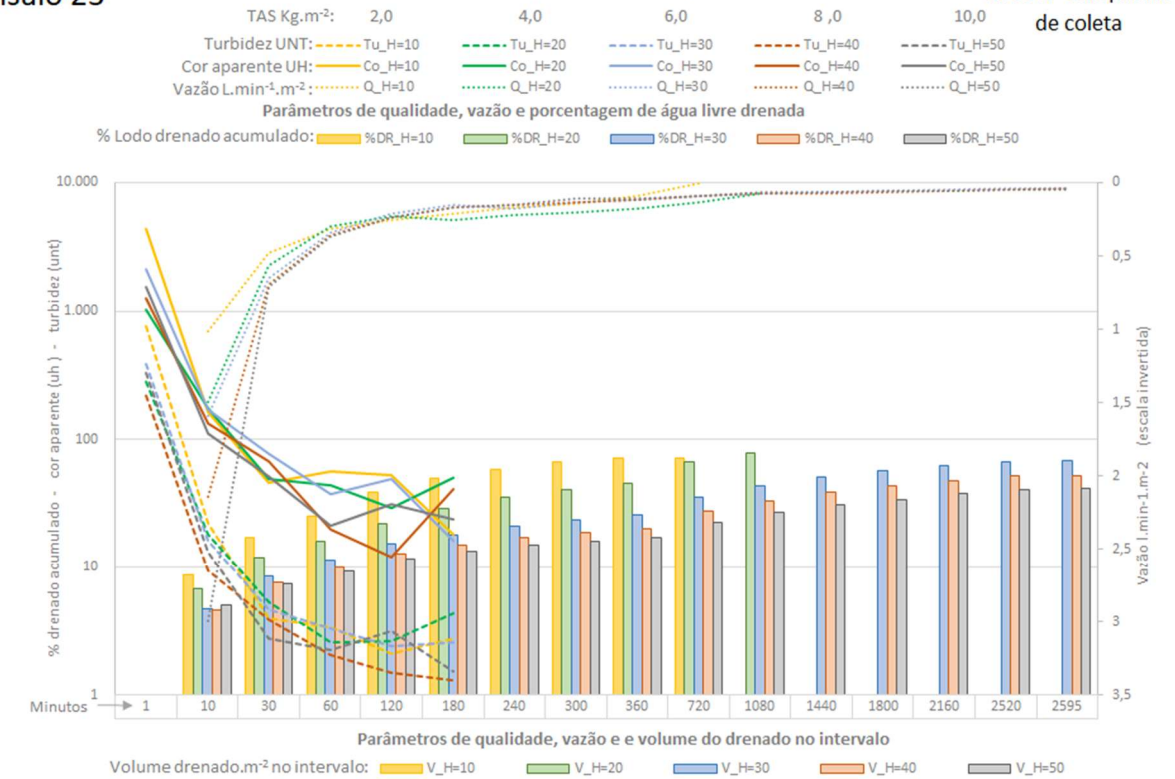
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 23

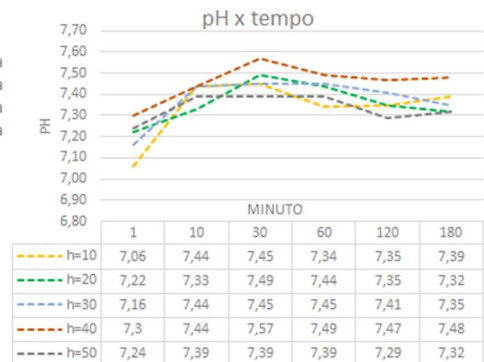
Ensaio %ST=2,0 - geotêxtil 55/55 UV

Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

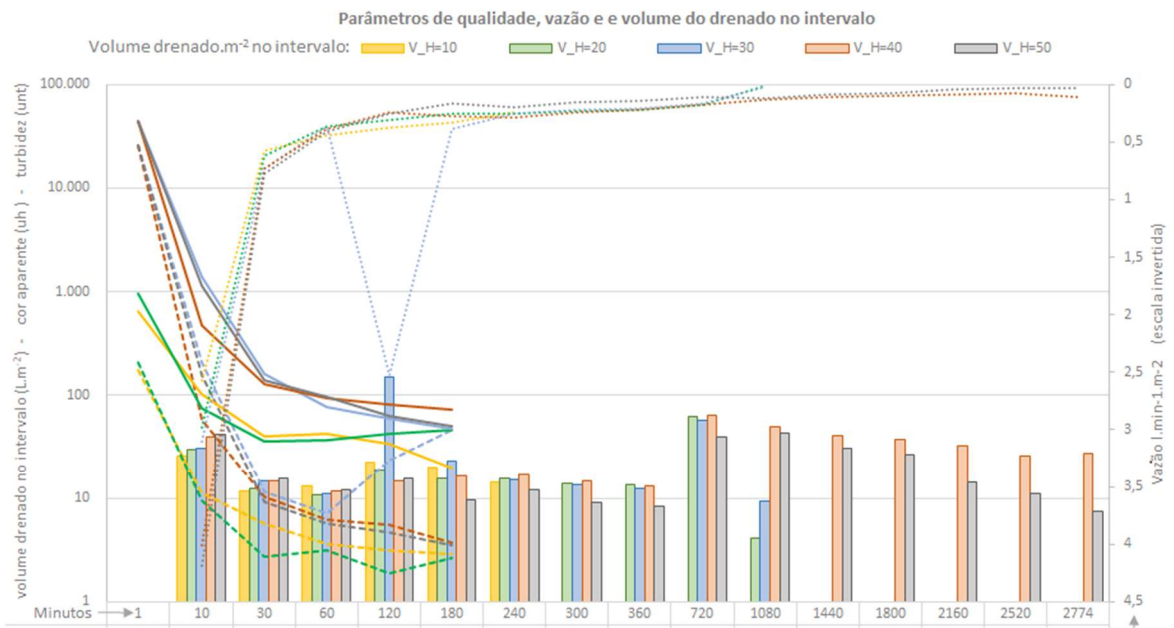
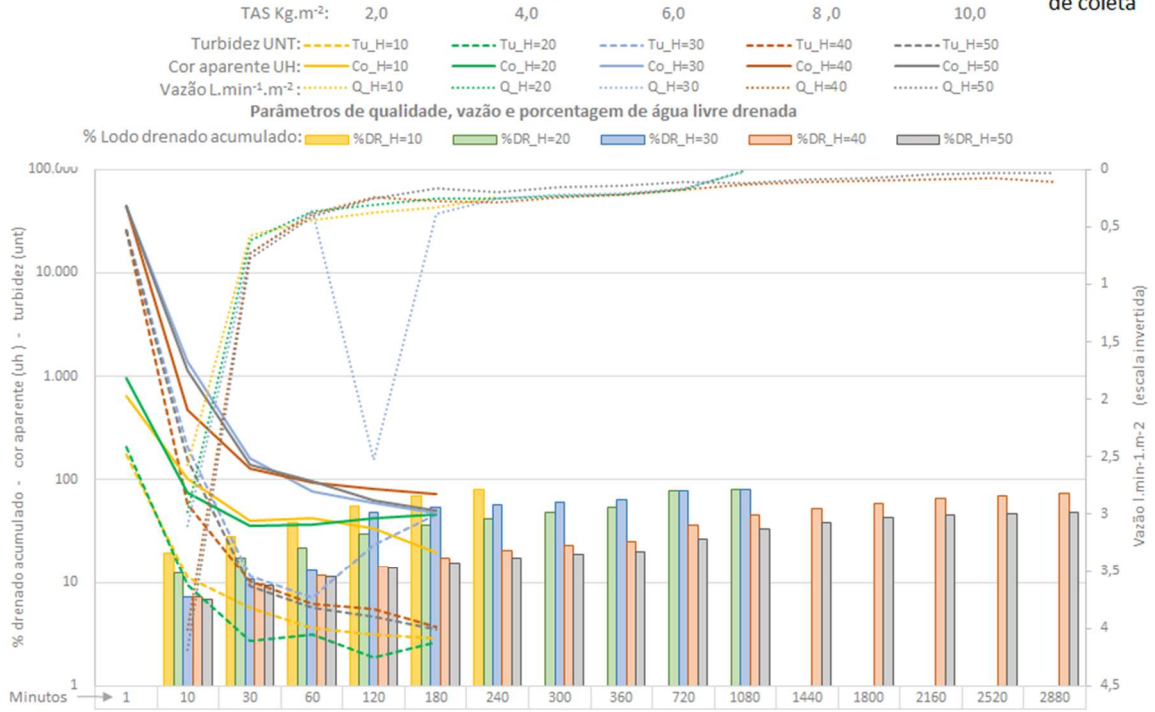
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 24

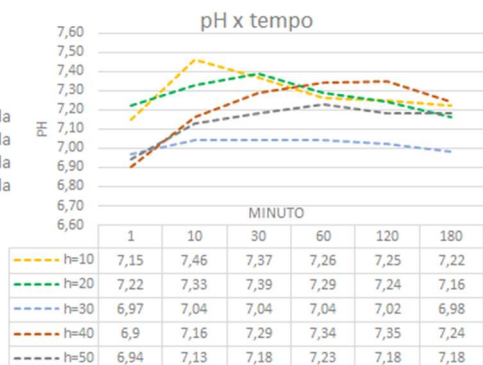
Ensaio %ST=2,0 - geotêxtil 105/105 DW

Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

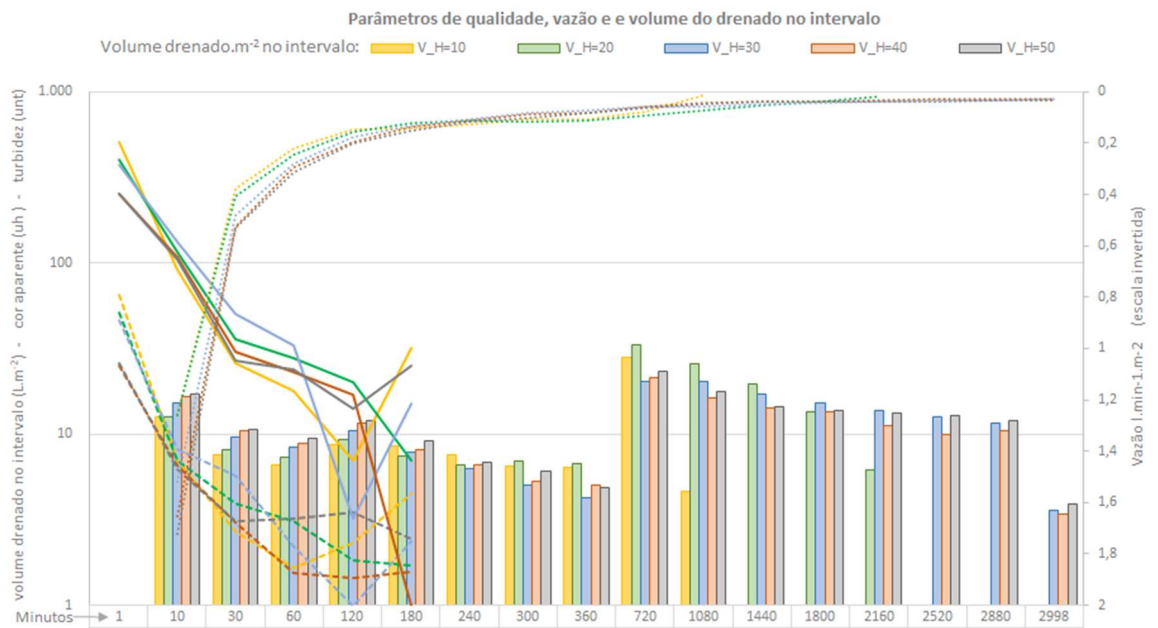
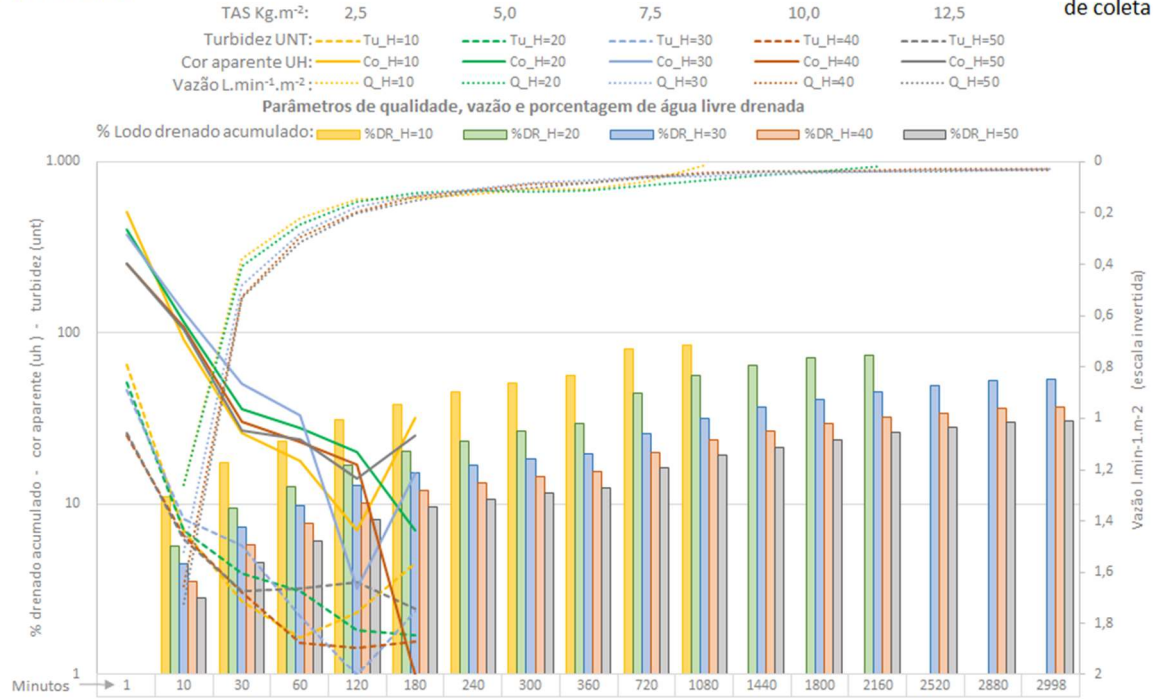
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 25

Ensaio %ST=2,5 - geotêxtil 600g.m² NT

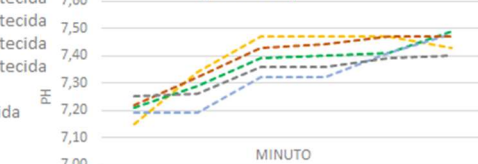
Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

pH x tempo

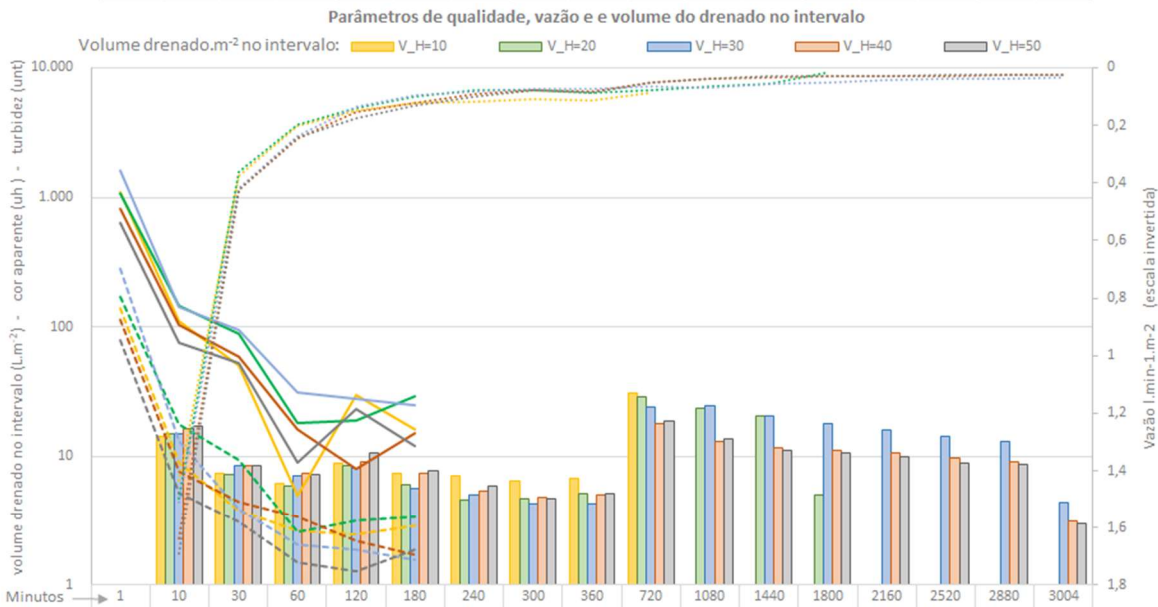
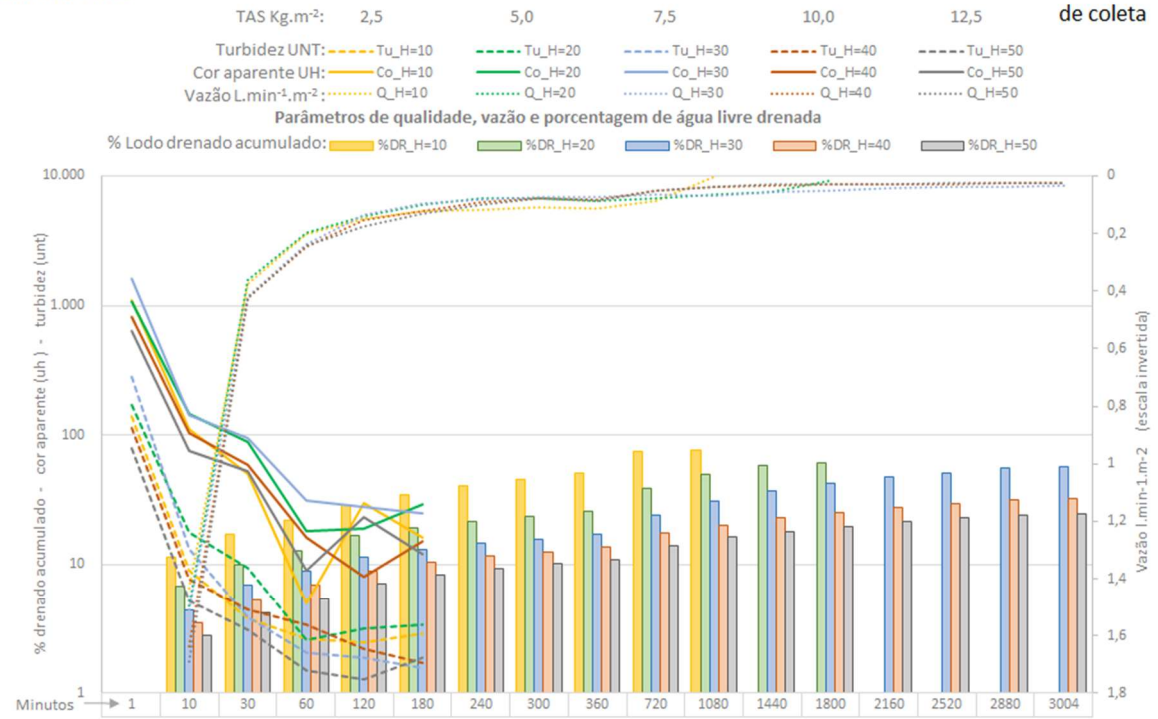


	1	10	30	60	120	180
h=10	7,15	7,34	7,47	7,47	7,47	7,43
h=20	7,21	7,29	7,39	7,4	7,41	7,49
h=30	7,19	7,19	7,32	7,32	7,41	7,48
h=40	7,22	7,32	7,43	7,44	7,47	7,47
h=50	7,25	7,26	7,36	7,36	7,39	7,4

Ensaio 26

Ensaio %ST=2,5 - geotêxtil 500g.m⁻² NT

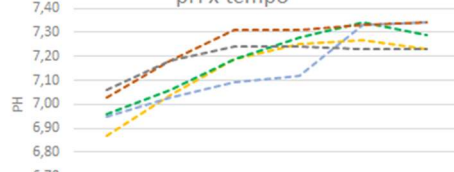
Lodo 1^o Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

pH x tempo

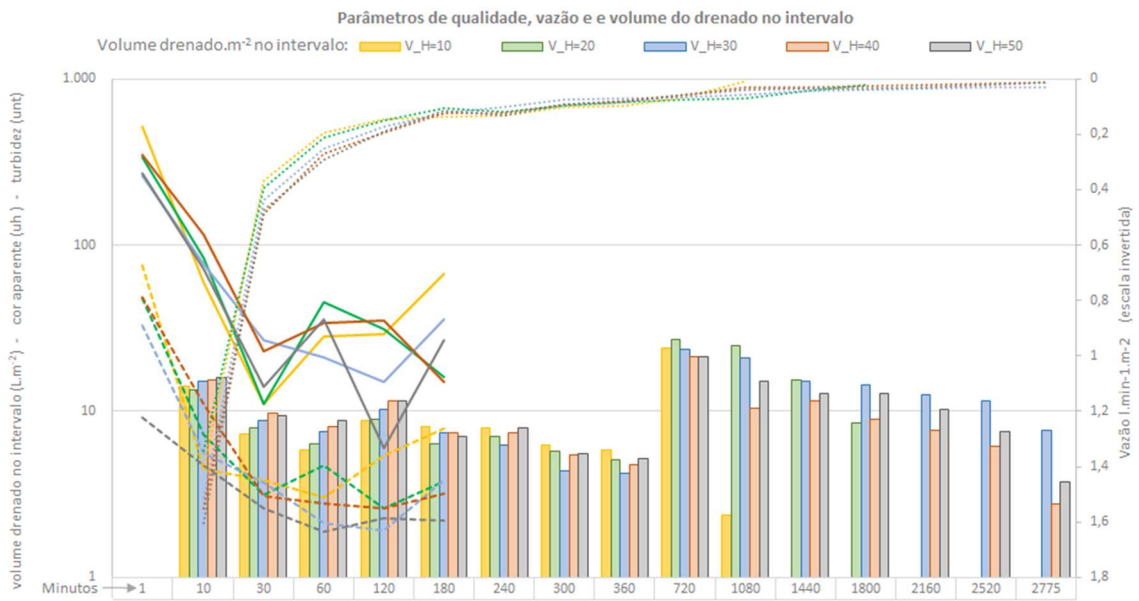
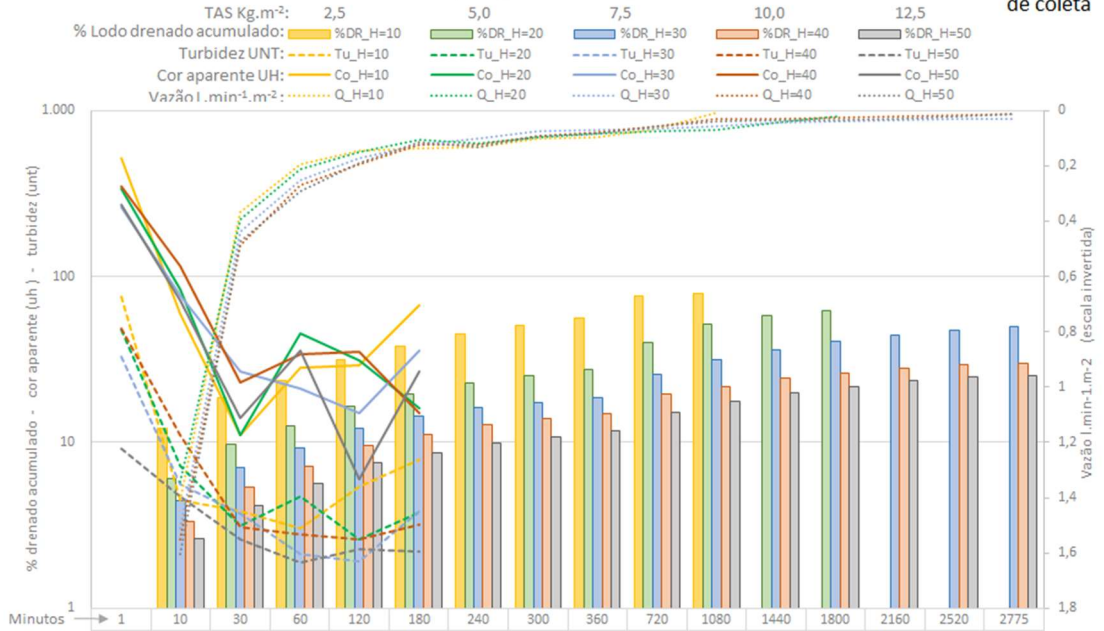


	1	10	30	60	120	180
h=10	6,87	7,04	7,19	7,25	7,27	7,23
h=20	6,96	7,06	7,19	7,28	7,34	7,29
h=30	6,95	7,03	7,09	7,12	7,33	7,34
h=40	7,03	7,18	7,31	7,31	7,33	7,34
h=50	7,06	7,18	7,24	7,24	7,23	7,23

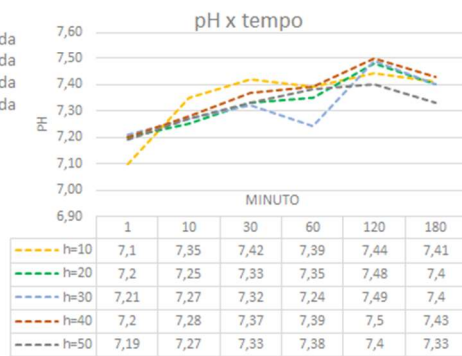
Ensaio 27

Ensaio %ST=2,5 - geotêxtil 400g.m⁻² NT

Lodo 1° Campanha de coleta



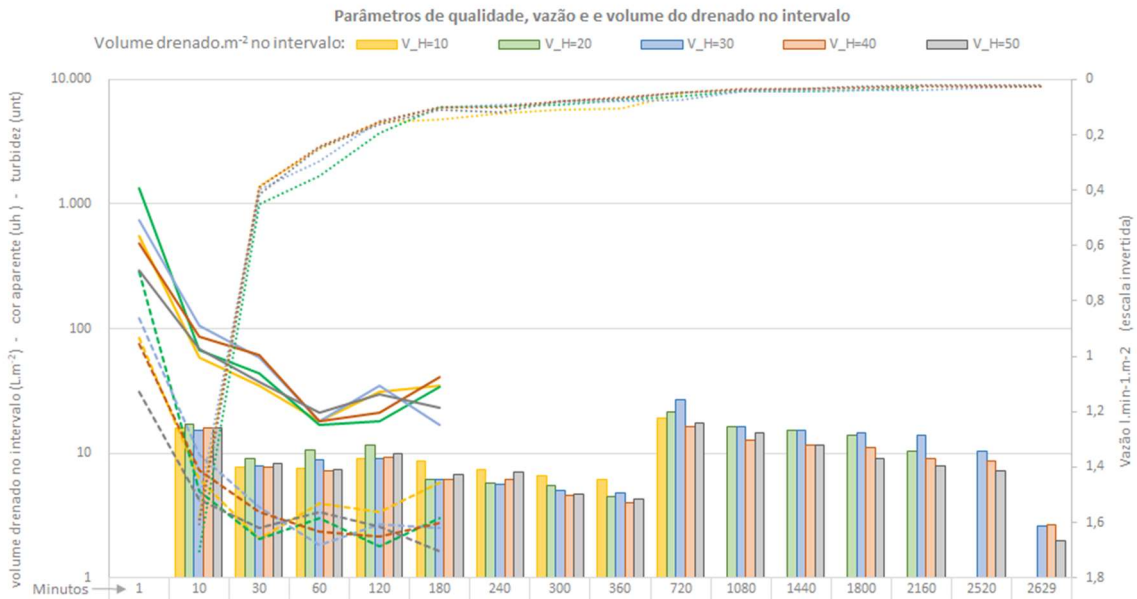
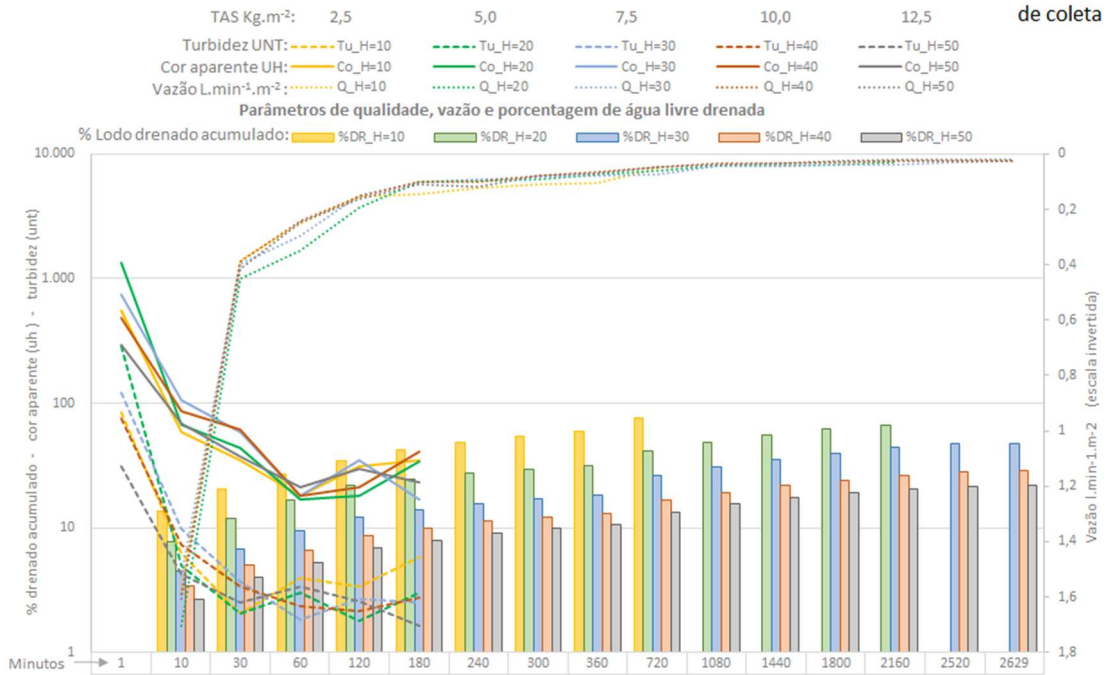
- Legenda Siglas:**
- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - Tu = Turbidez (UNT)
 - Co = Cor aparente (UH)
 - Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 - ST = % de sólidos totais inicial
 - 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 28

Ensaio %ST=2,5 - geotêxtil 300g.m⁻² NT

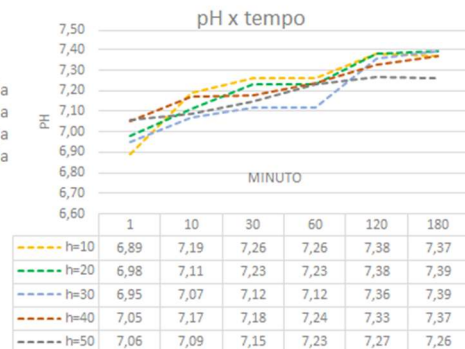
Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial

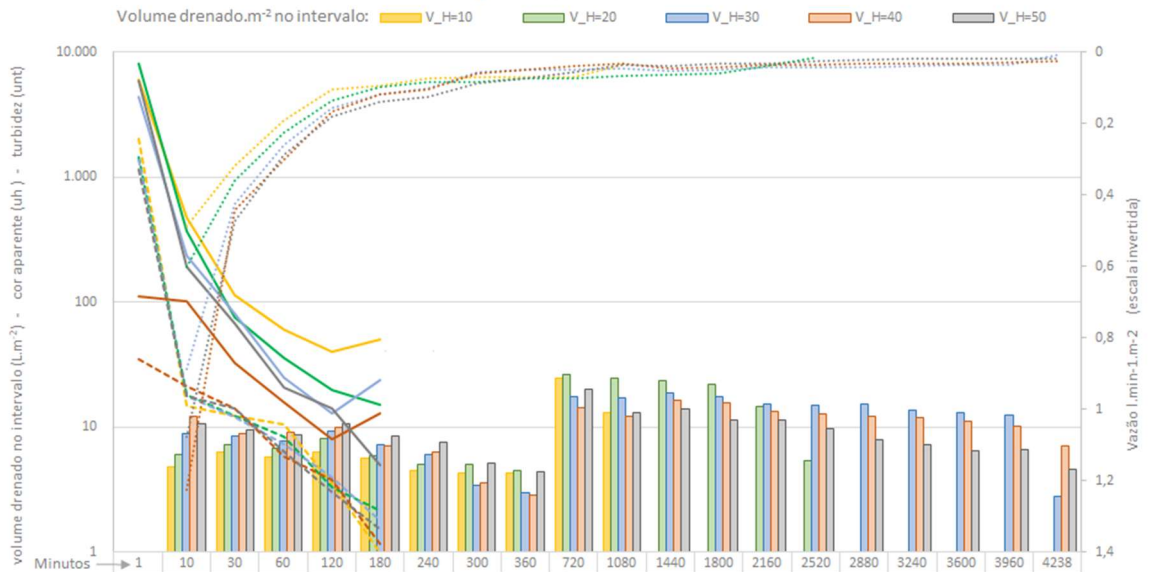
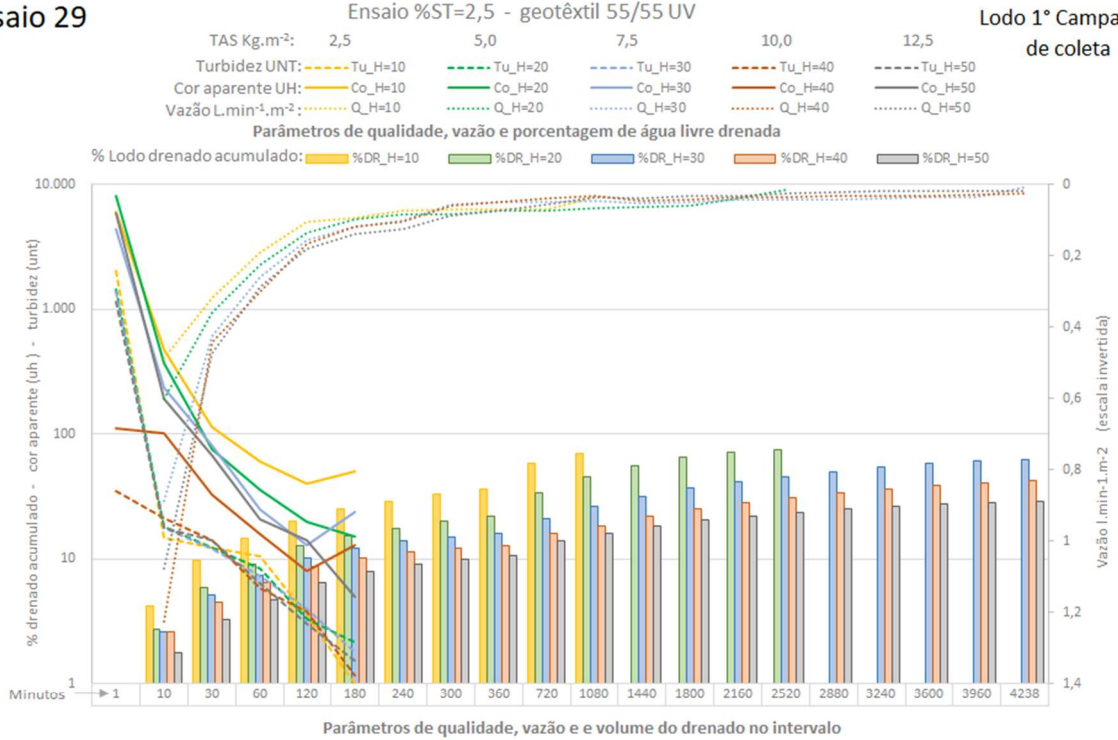
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 29

Ensaio %ST=2,5 - geotêxtil 55/55 UV

Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

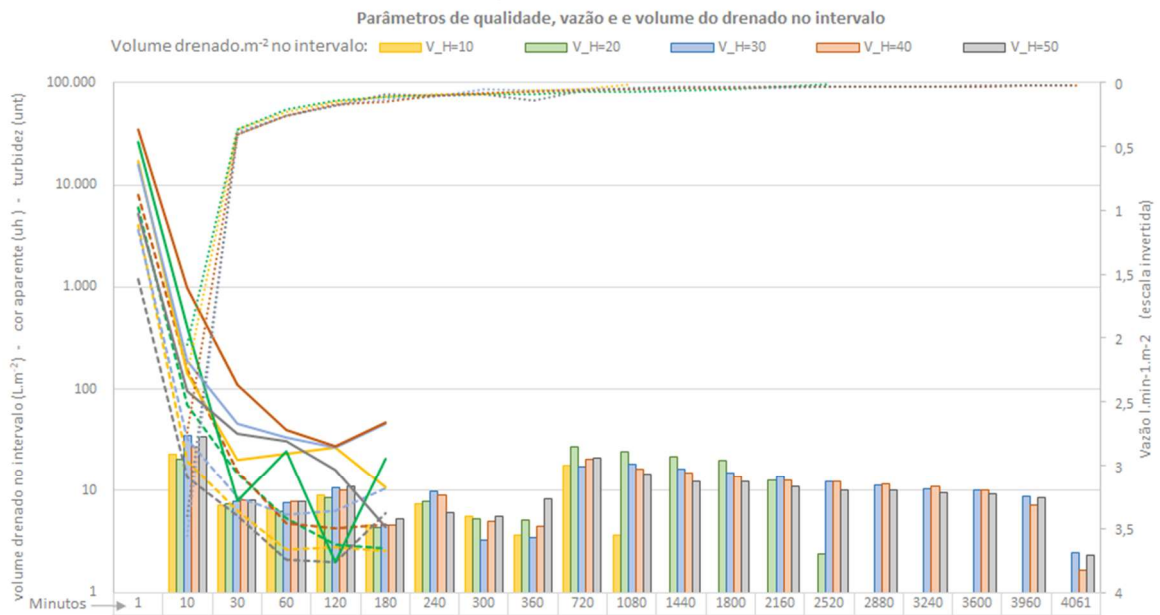
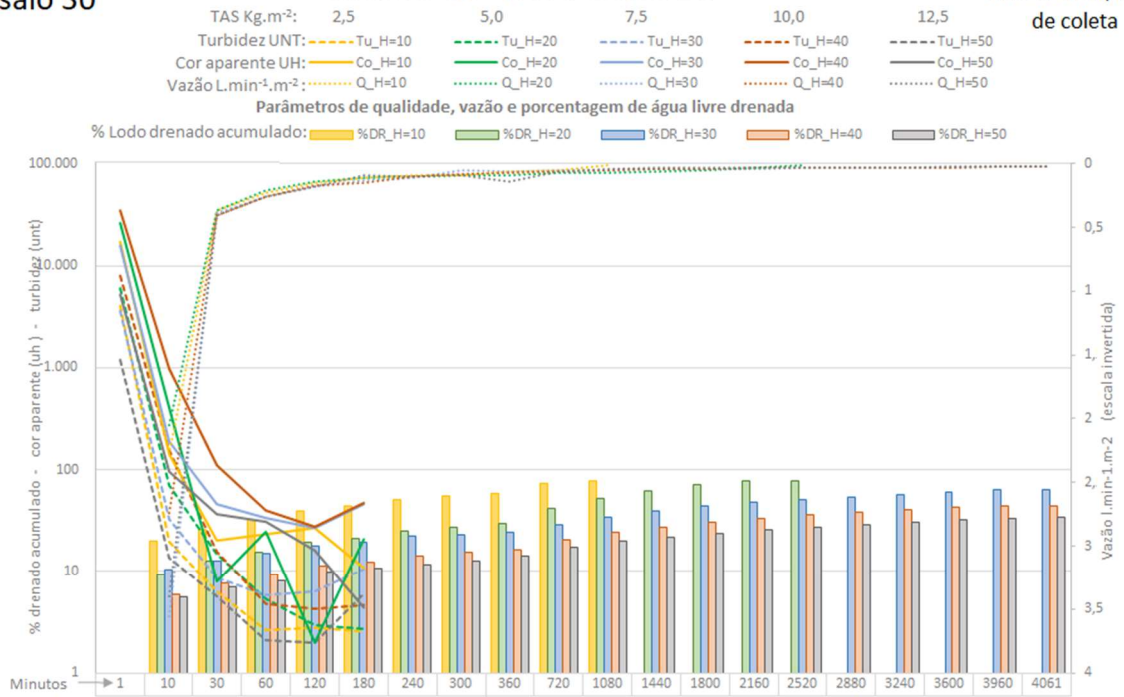


	1	10	30	60	120	180
h=10	6,95	7,31	7,38	7,31	7,17	7,26
h=20	6,91	7,33	7,4	7,4	7,33	7,42
h=30	6,94	7,32	7,38	7,36	7,38	7,42
h=40	7,03	7,53	7,6	7,52	7,44	7,45
h=50	7	7,4	7,4	7,4	7,37	7,36

Ensaio 30

Ensaio %ST=2,5 - geotêxtil 105/105 DW

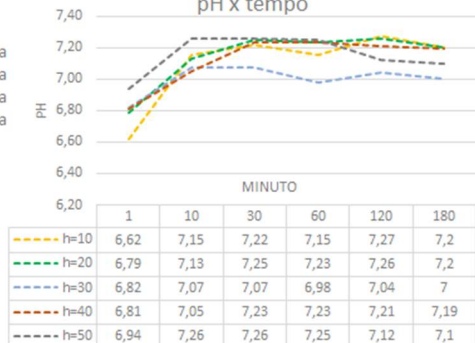
Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - Tu = Turbidez (UNT)
 - Co = Cor aparente (UH)
 - Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
 - ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

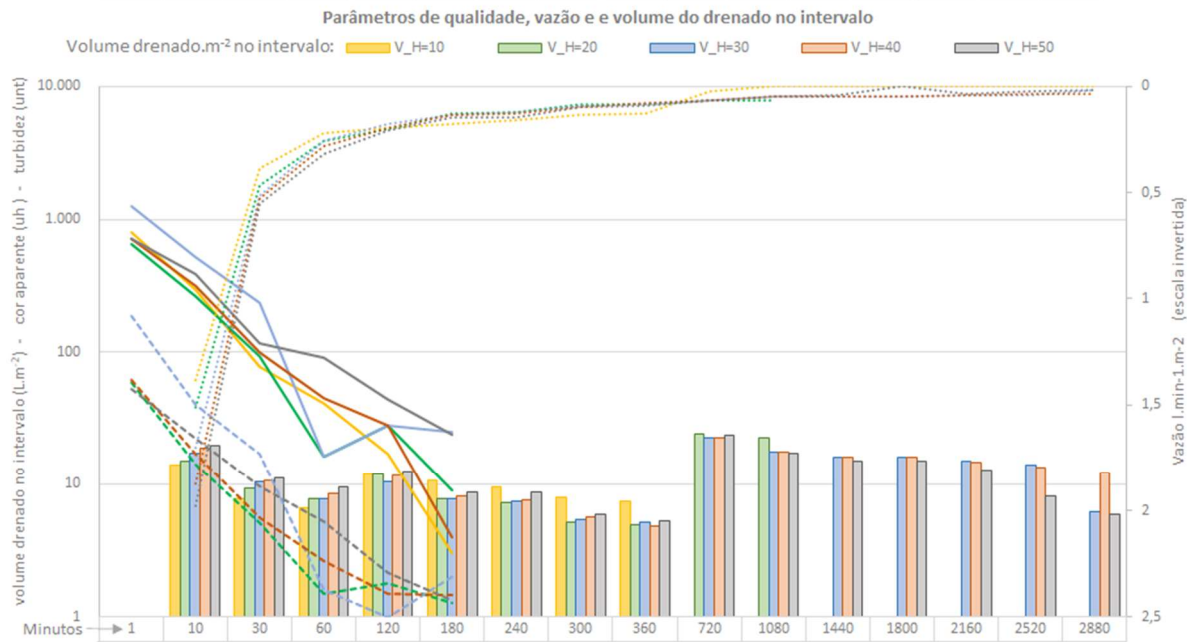
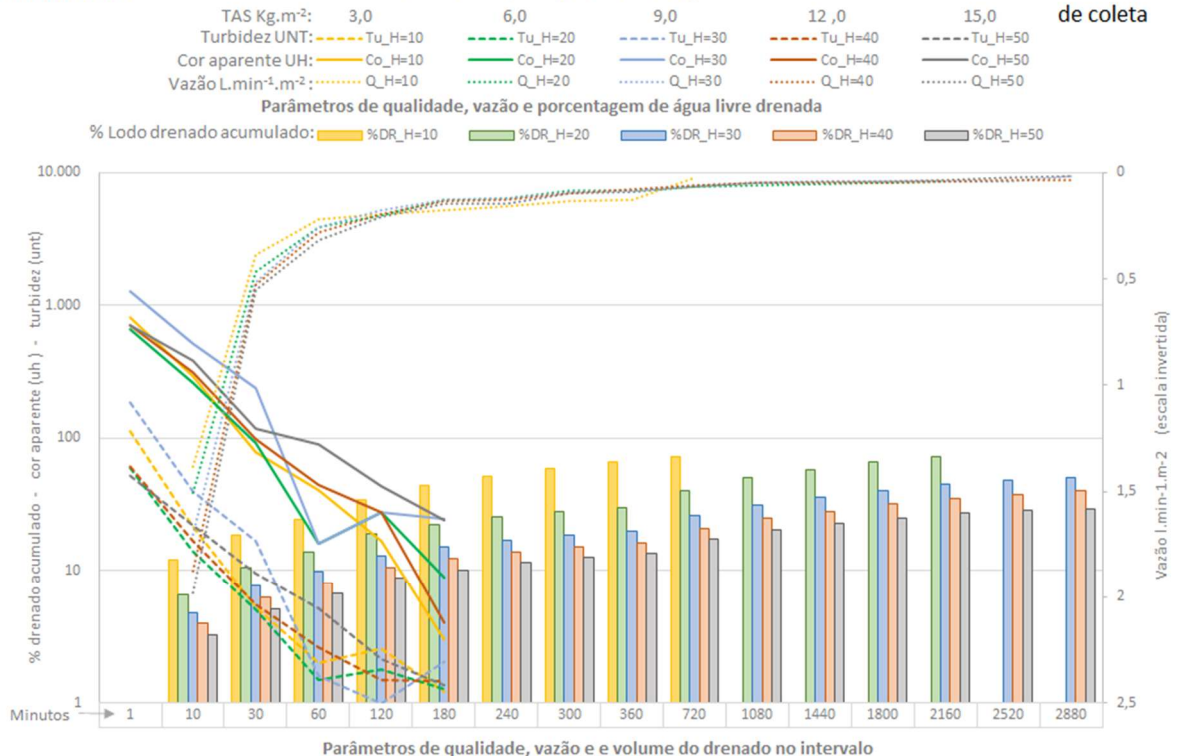
pH x tempo



Ensaio 31

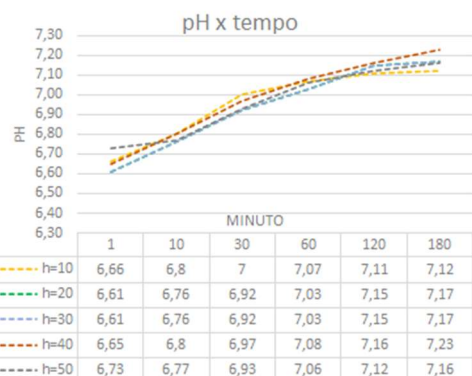
Ensaio %ST=3,0 - geotêxtil 600g.m⁻² NT

Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

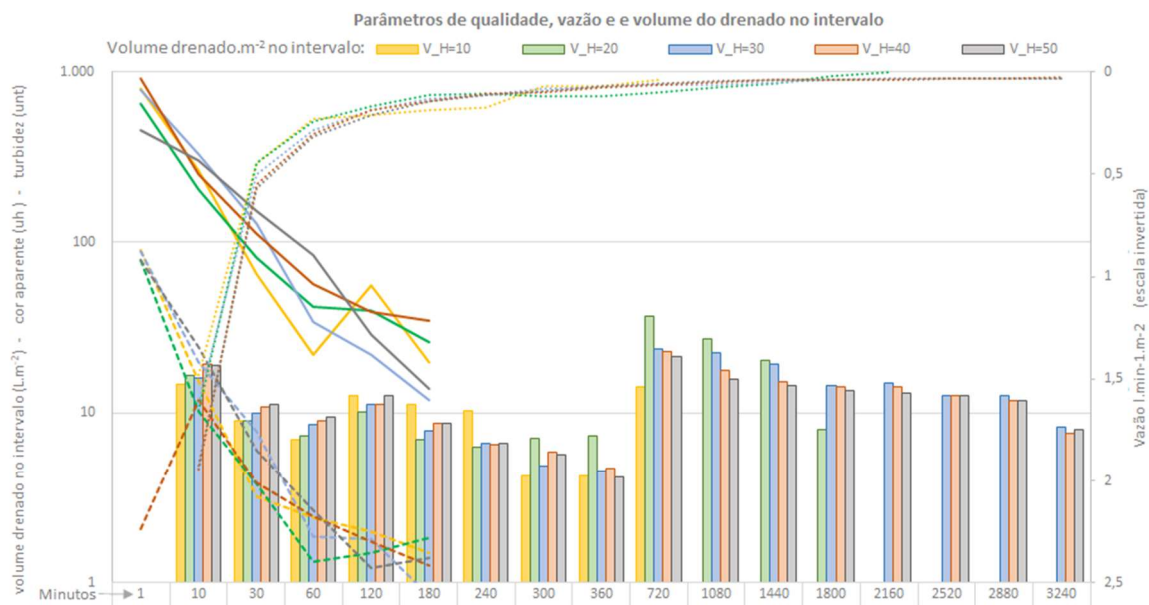
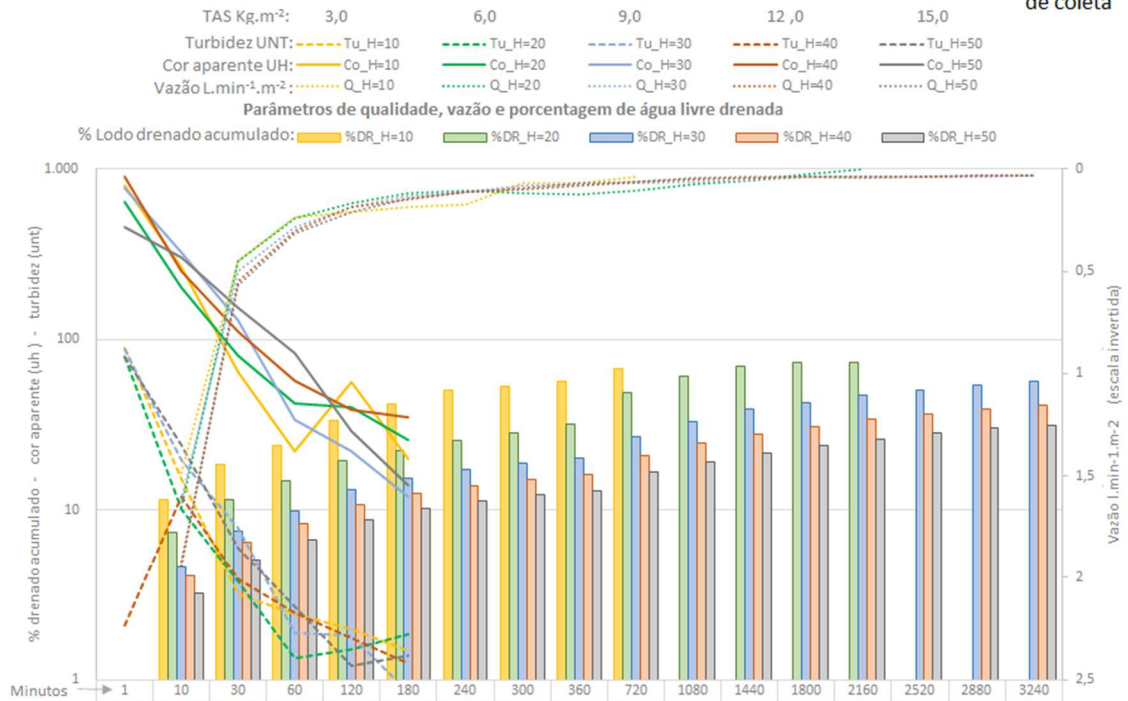
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 32

Ensaio %ST=3,0 - geotêxtil 500g.m² NT

Lodo 1ª Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

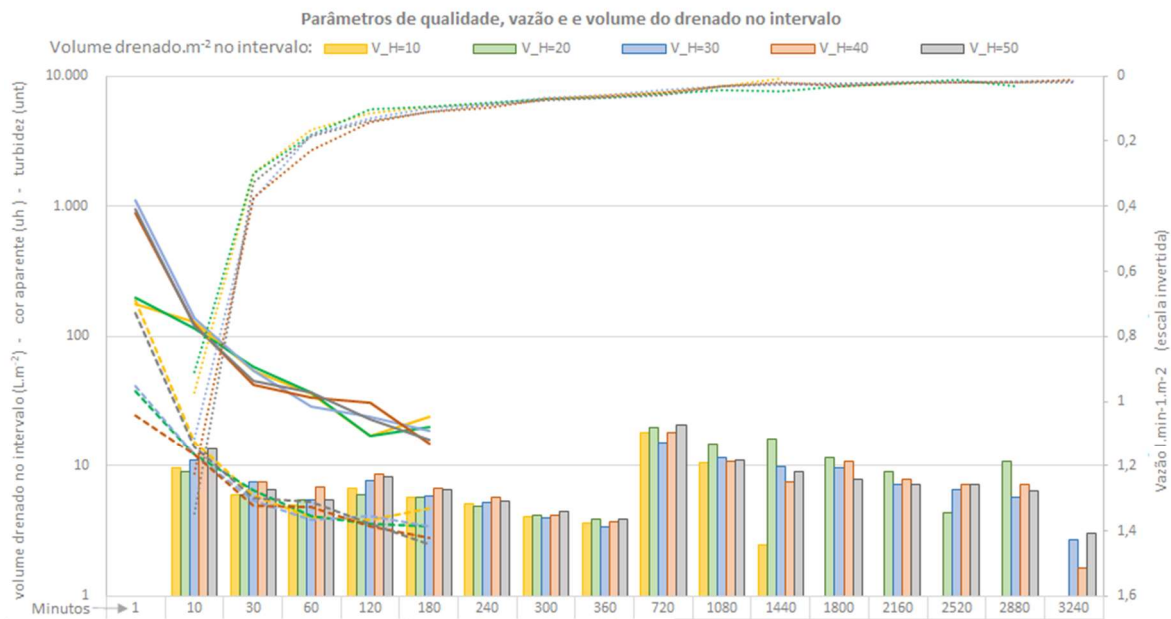
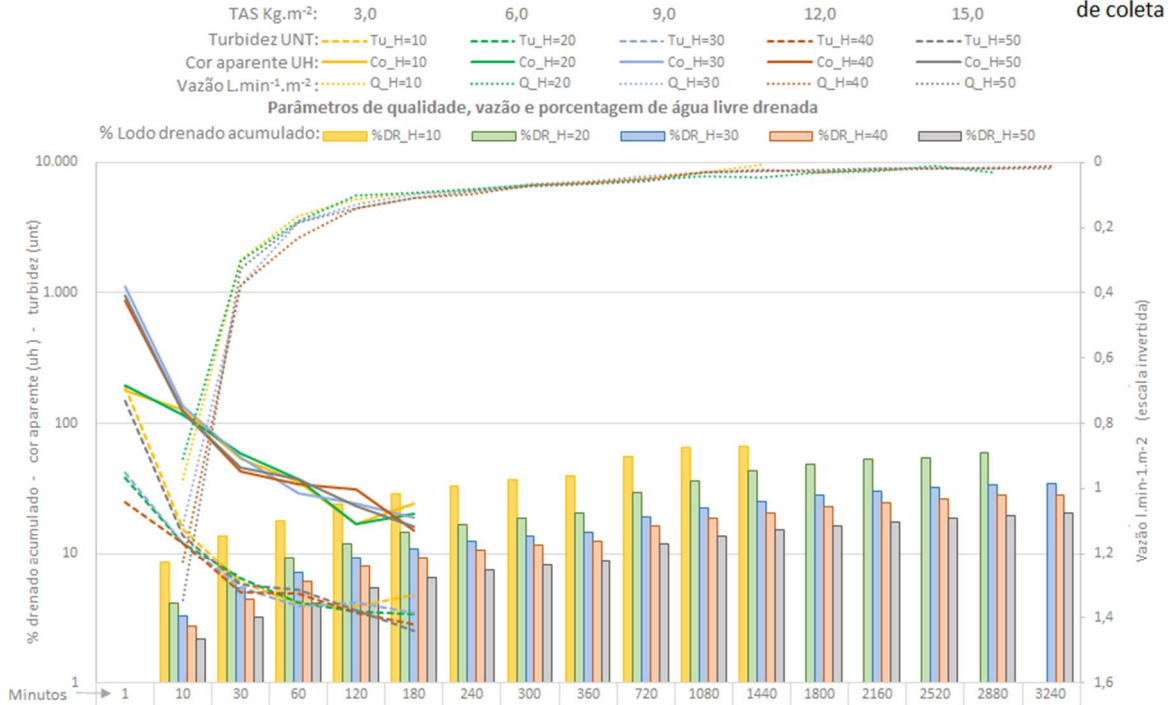


	1	10	30	60	120	180
h=10	6,73	6,86	7,01	7,09	7,2	7,16
h=20	6,73	6,85	7,02	7,1	7,35	7,27
h=30	6,79	6,87	6,89	6,89	6,98	6,85
h=40	6,8	7,04	7,14	7,2	7,24	7,2
h=50	6,87	6,96	7,01	7,11	7,11	7,14

Ensaio 33

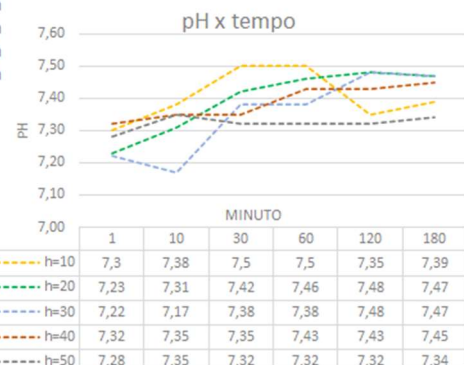
Ensaio %ST=3,0 - geotêxtil 400g.m⁻² NT

Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

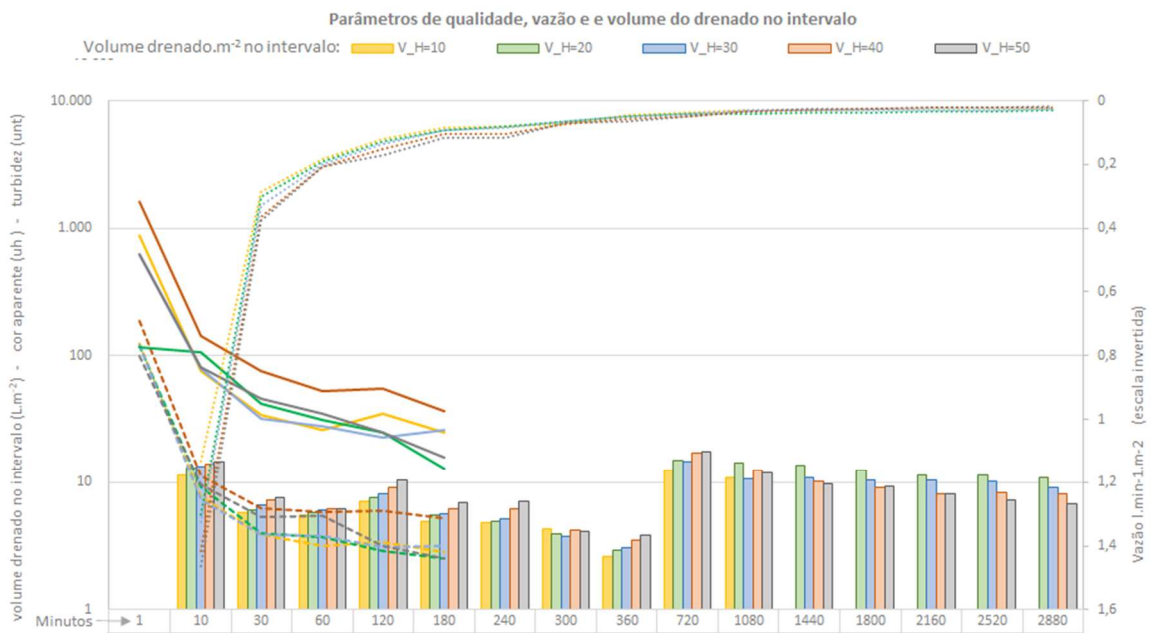
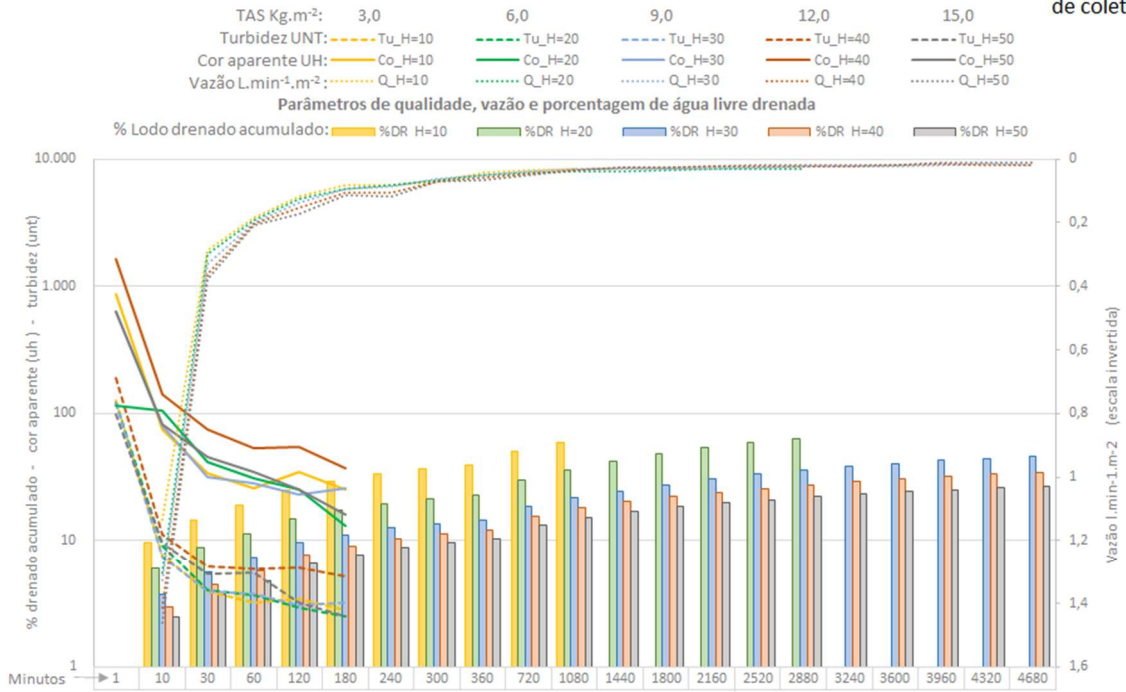
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 34

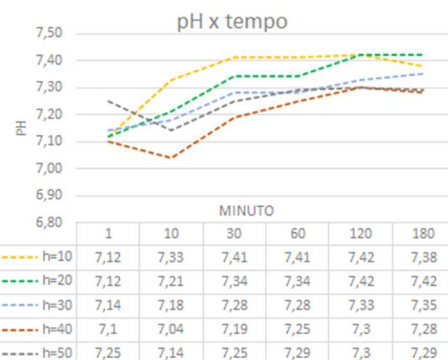
Ensaio %ST=3,0 - geotêxtil 300g.m⁻² NT

Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

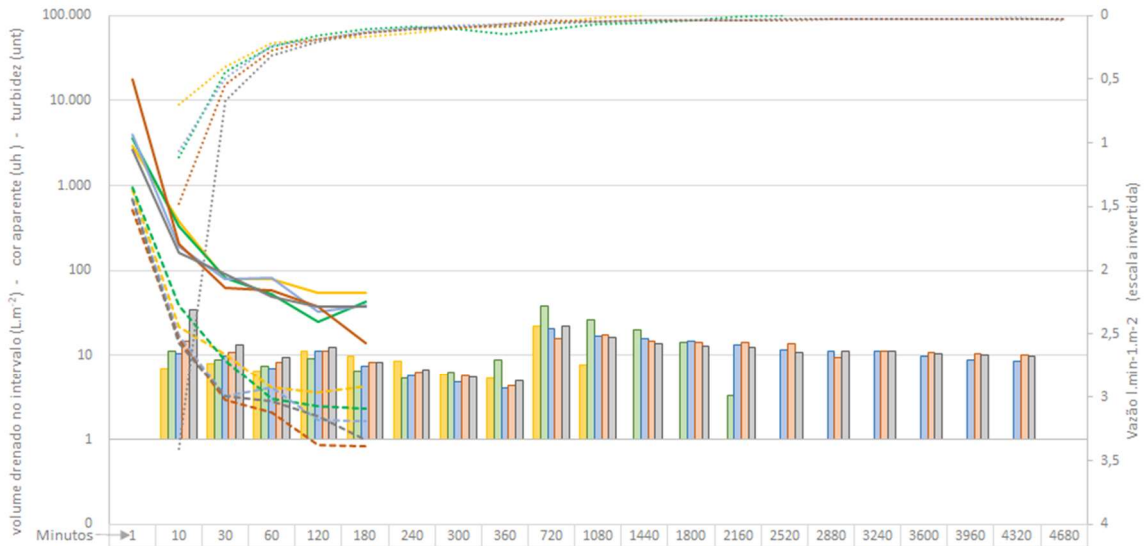
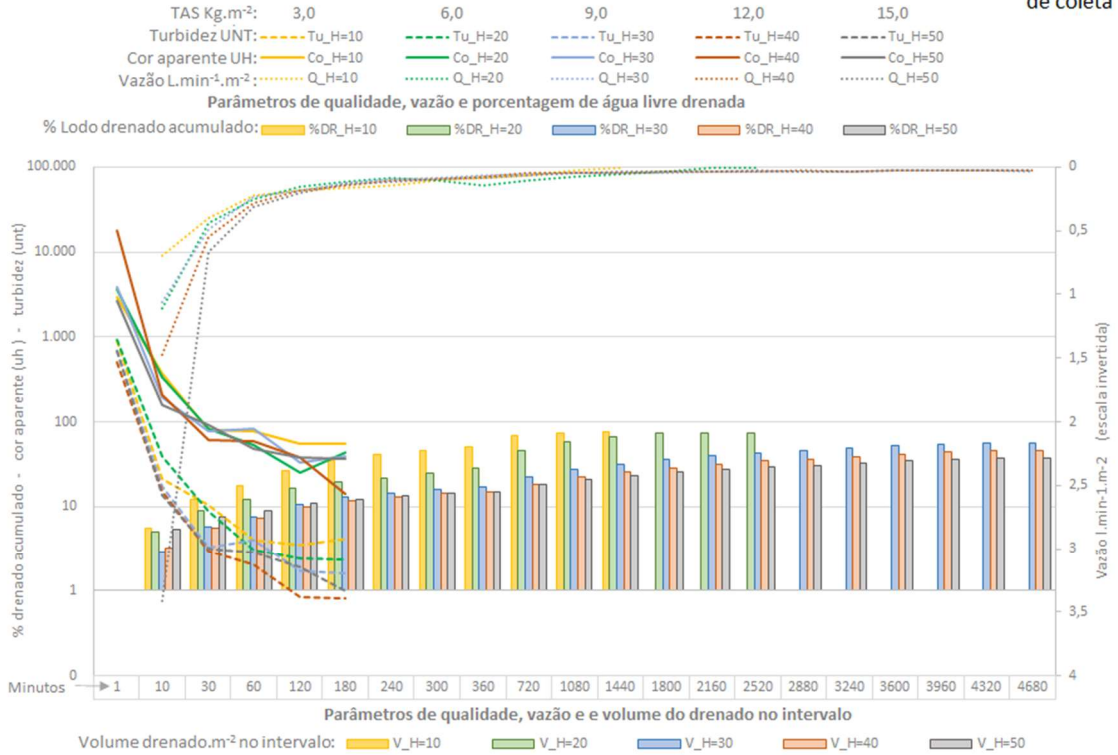
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 35

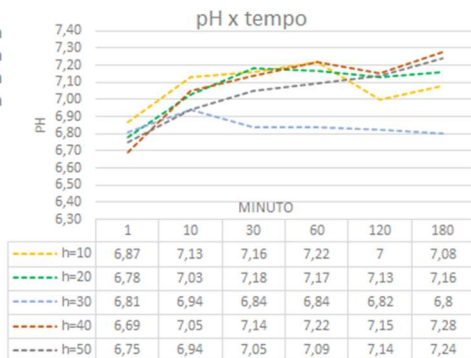
Ensaio %ST=3,0 - geotêxtil 55/55 UV

Lodo 1° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

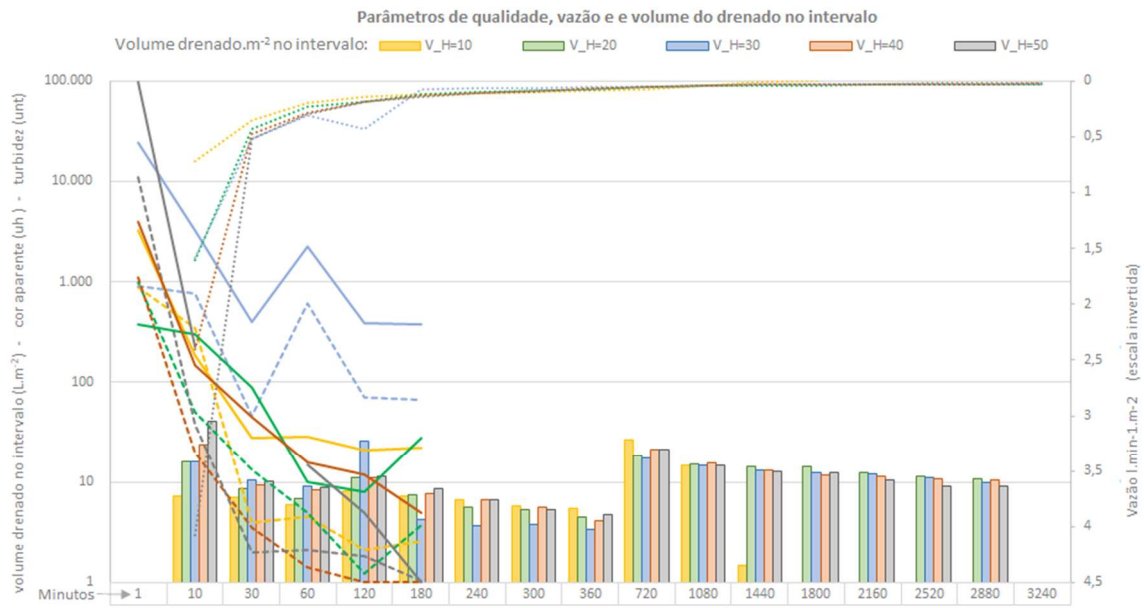
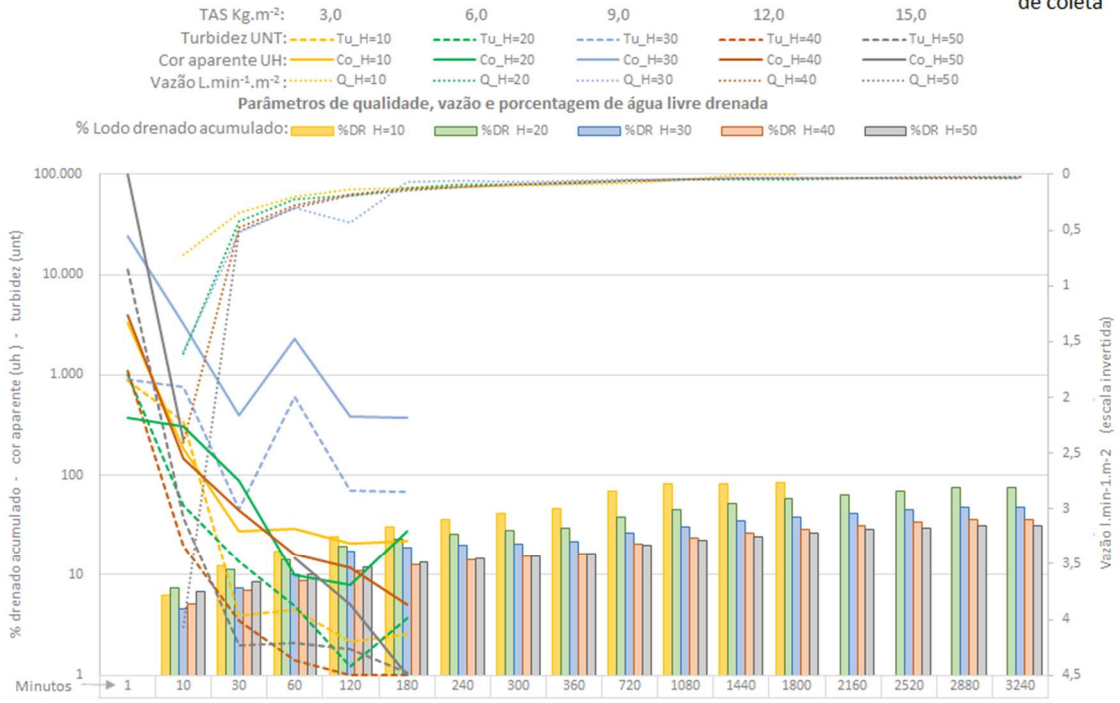
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 36

Ensaio %ST=3,0 - geotêxtil 105/105 DW

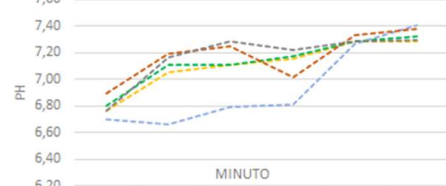
Lodo 1ª Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecido
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecido
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecido
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecido
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecido
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecido

pH x tempo



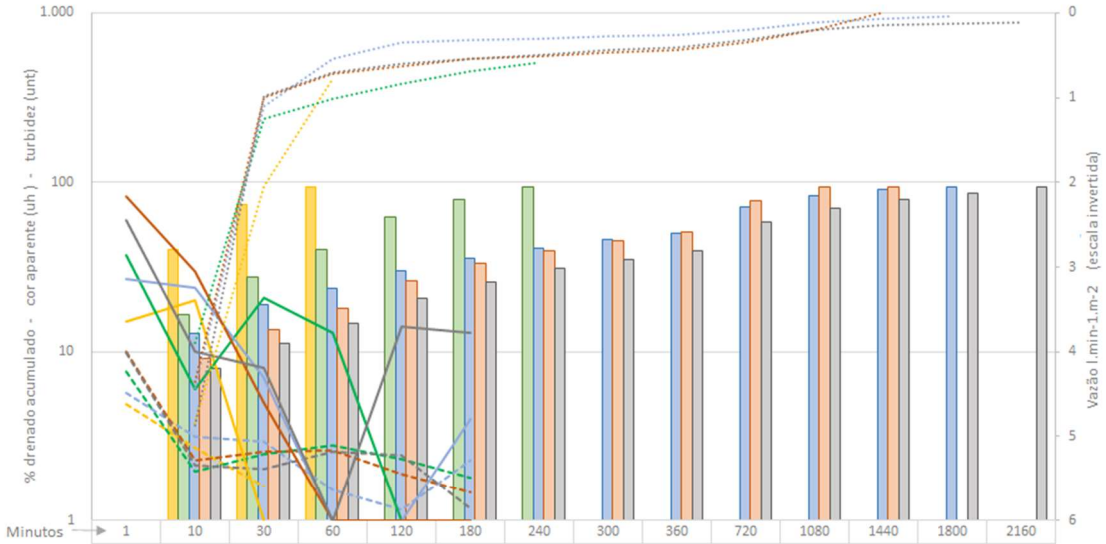
	MINUTO					
	1	10	30	60	120	180
h=10	6,76	7,05	7,11	7,15	7,28	7,28
h=20	6,8	7,11	7,11	7,17	7,28	7,32
h=30	6,7	6,66	6,79	6,81	7,27	7,41
h=40	6,89	7,19	7,25	7,01	7,33	7,38
h=50	6,76	7,16	7,28	7,22	7,28	7,29

Ensaio 37

Ensaio %ST=0,5 - geotêxtil 600g.m⁻² NT

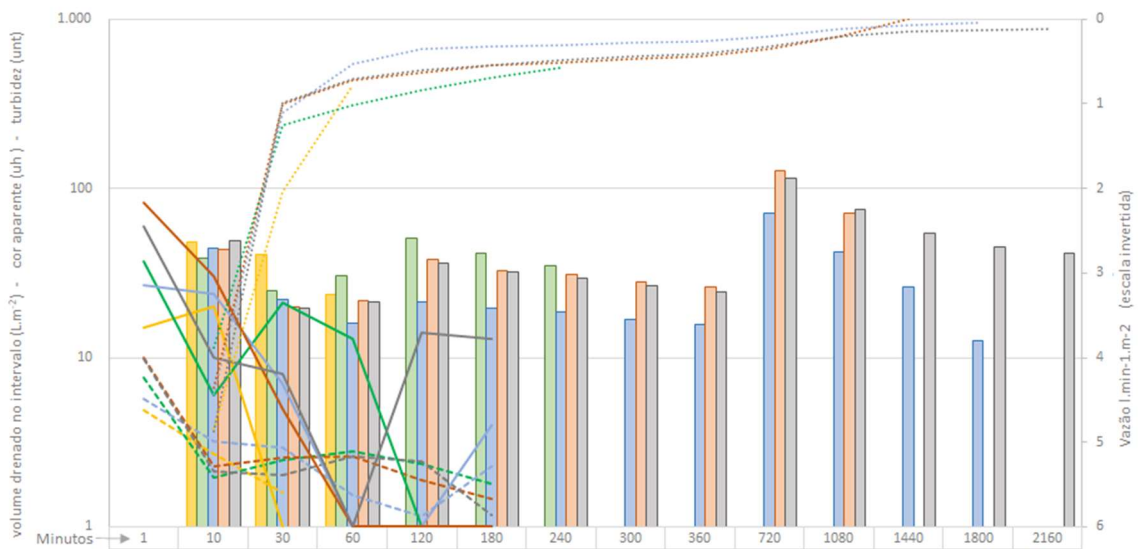
Lodo 2° Campanha de coleta

TAS Kg.m⁻²: 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5
 Turbidez UNT: Tu_H=10 Tu_H=20 Tu_H=30 Tu_H=40 Tu_H=50
 Cor aparente UH: Co_H=10 Co_H=20 Co_H=30 Co_H=40 Co_H=50
 Vazão L.min⁻¹.m⁻²: Q_H=10 Q_H=20 Q_H=30 Q_H=40 Q_H=50
Parâmetros de qualidade, vazão e porcentagem de água livre drenada
 % Lodo drenado acumulado: %DR_H=10 %DR_H=20 %DR_H=30 %DR_H=40 %DR_H=50



Parâmetros de qualidade, vazão e volume do drenado no intervalo

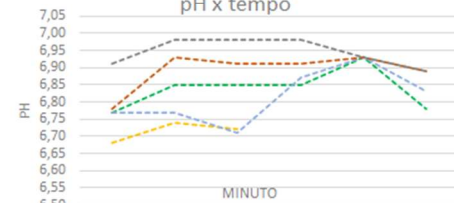
Volume drenado no intervalo: V_H=10 V_H=20 V_H=30 V_H=40 V_H=50



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

pH x tempo

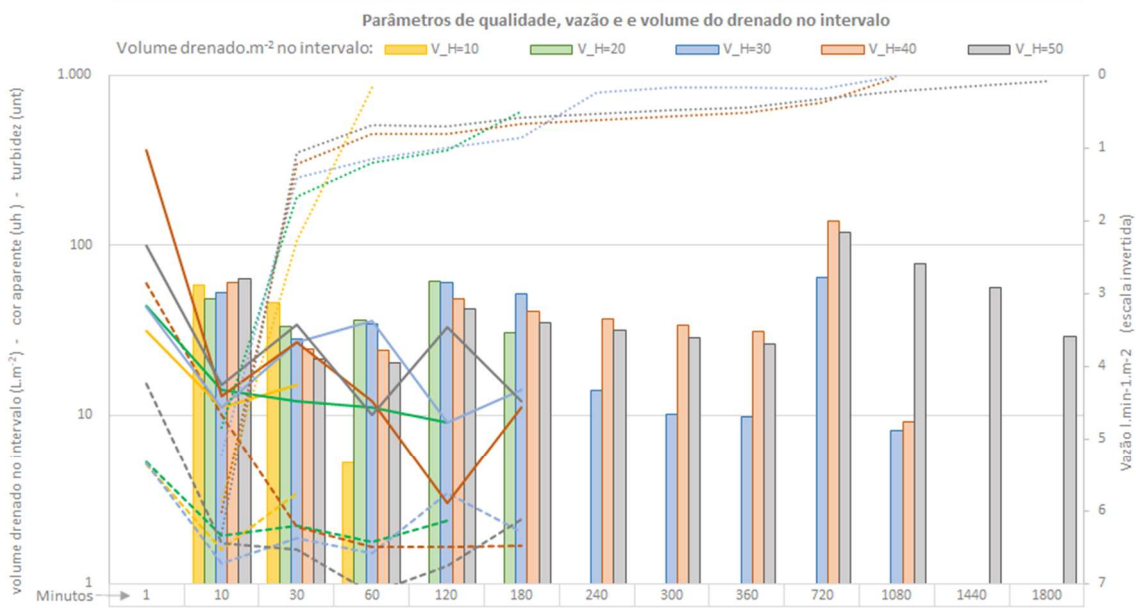
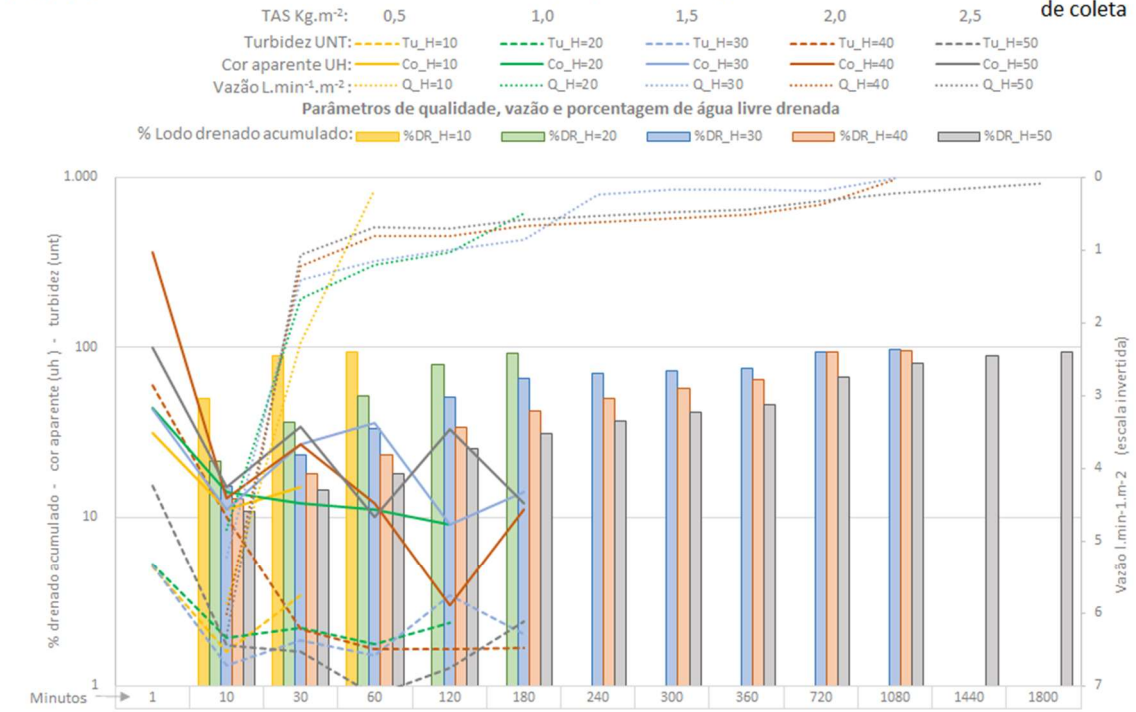


	MINUTO					
	1	10	30	60	120	180
h=10	6,68	6,74	6,72			
h=20	6,77	6,85	6,85	6,85	6,93	6,78
h=30	6,77	6,77	6,71	6,87	6,93	6,83
h=40	6,78	6,93	6,91	6,91	6,93	6,89
h=50	6,91	6,98	6,98	6,98	6,93	6,89

Ensaio 38

Ensaio %ST=0,5 - geotêxtil 500g.m⁻² NT

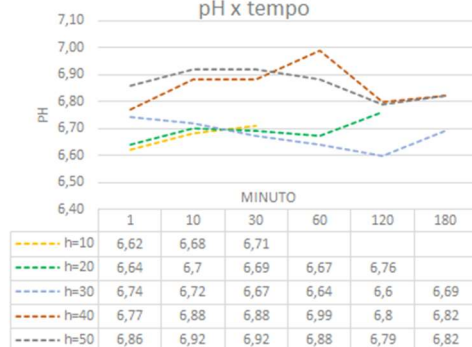
Lodo 2° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

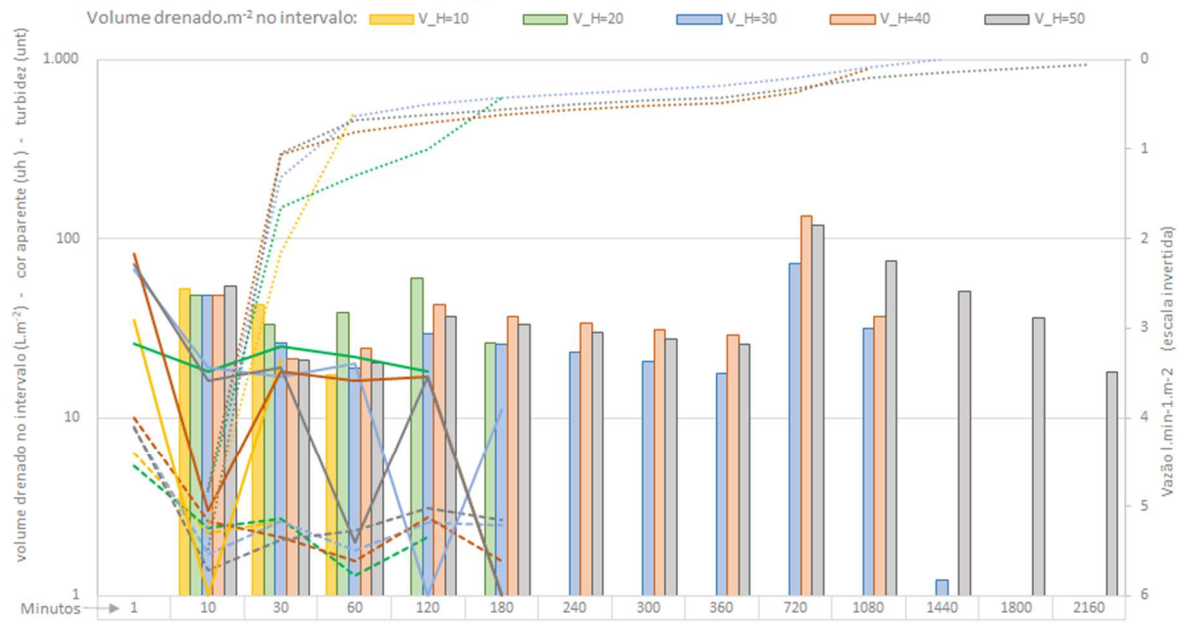
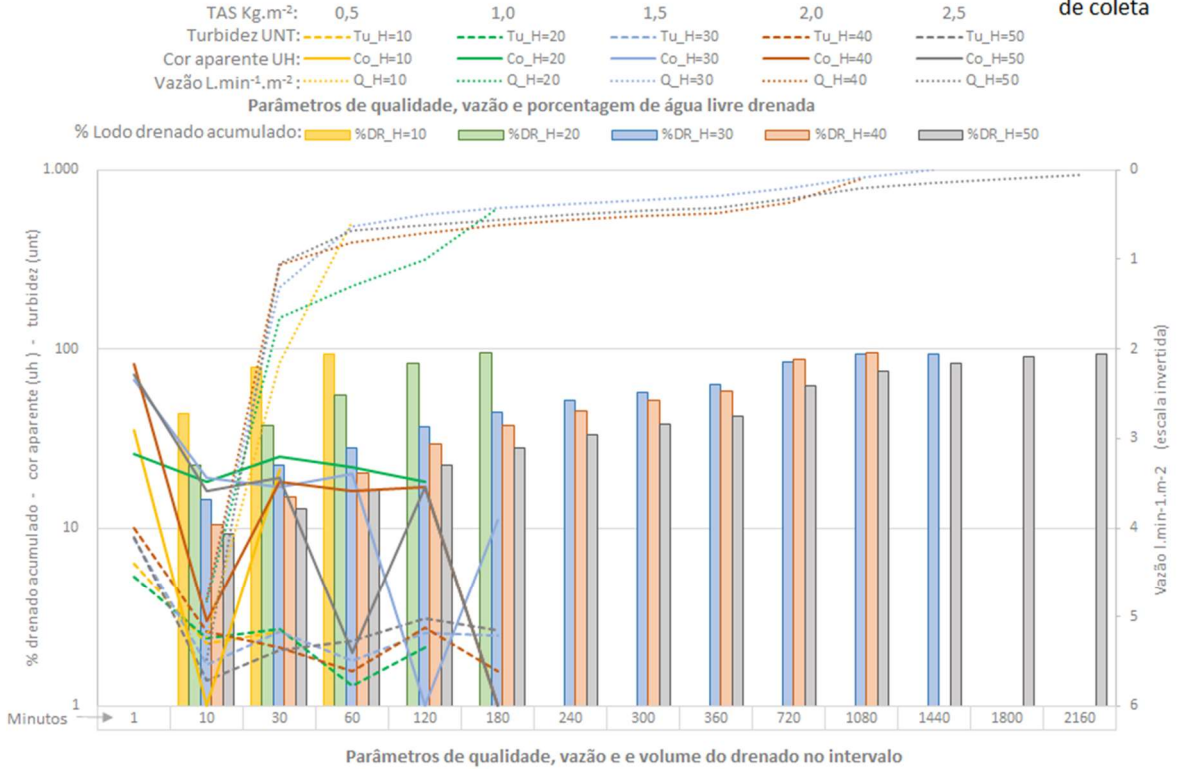
pH x tempo



Ensaio 39

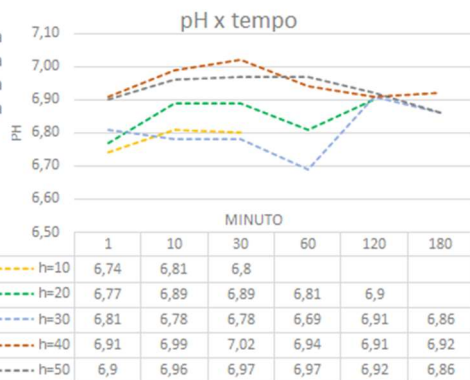
Ensaio %ST=0,5 - geotêxtil 400g.m⁻² NT

Lodo 2° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

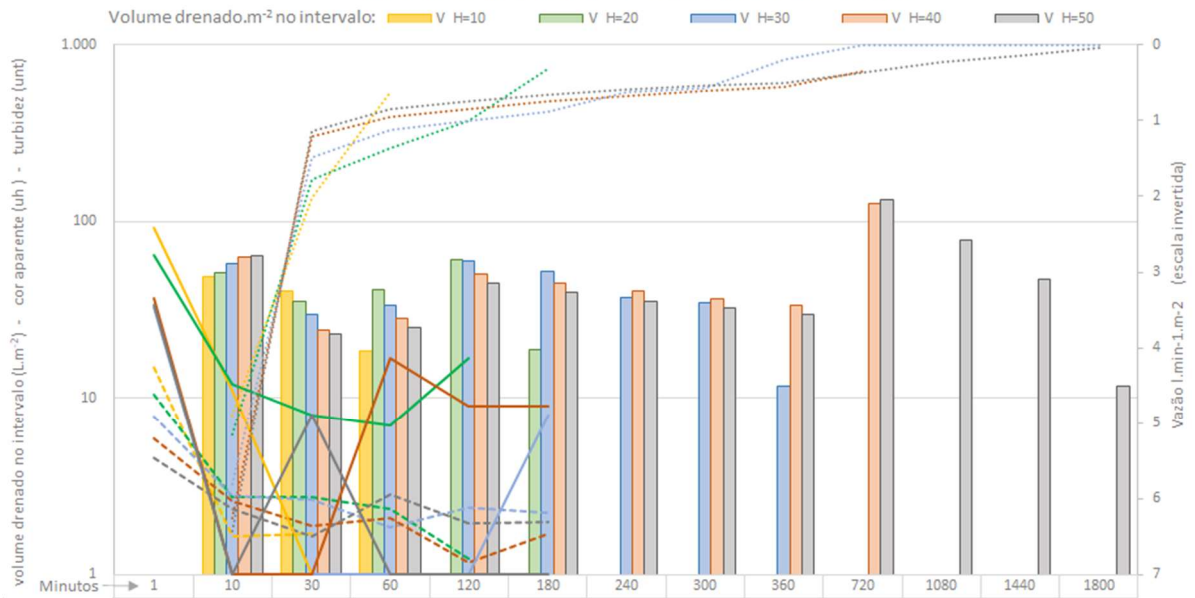
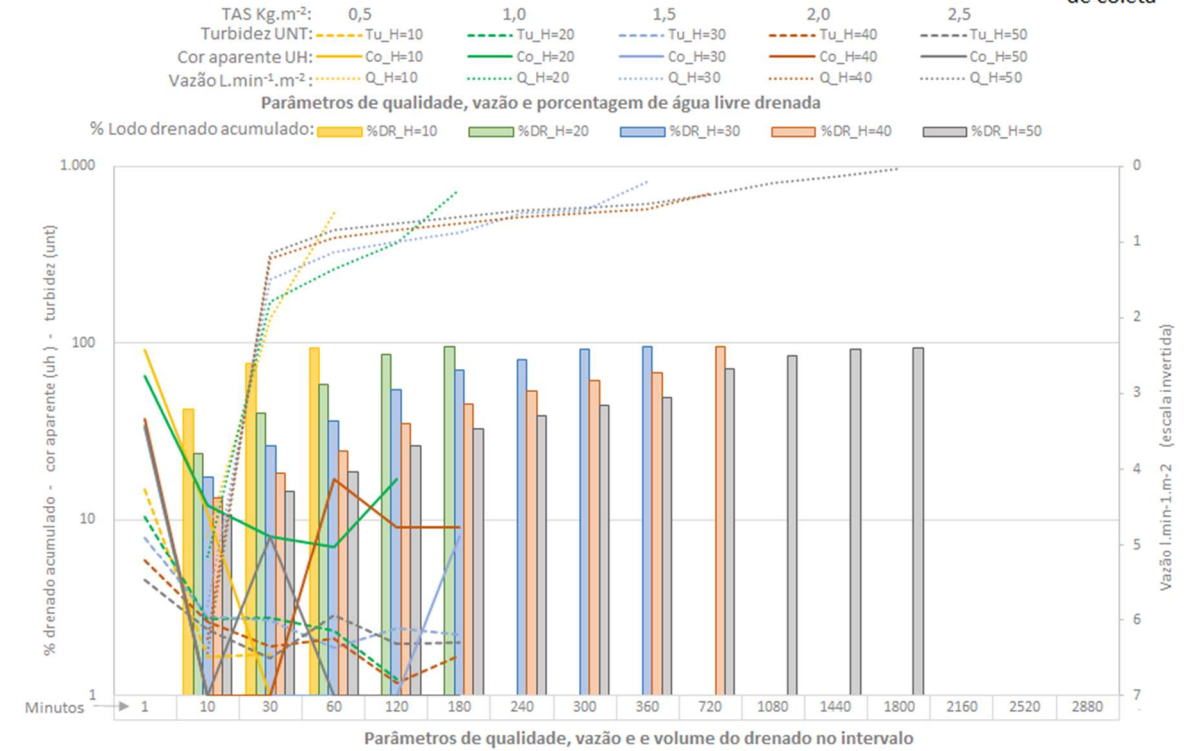
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



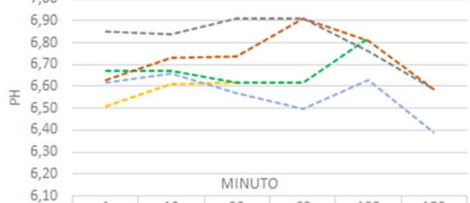
Ensaio 40

Ensaio %ST=0,5 - geotêxtil 300g.m⁻² NT

Lodo 2° Campanha de coleta



pH x tempo

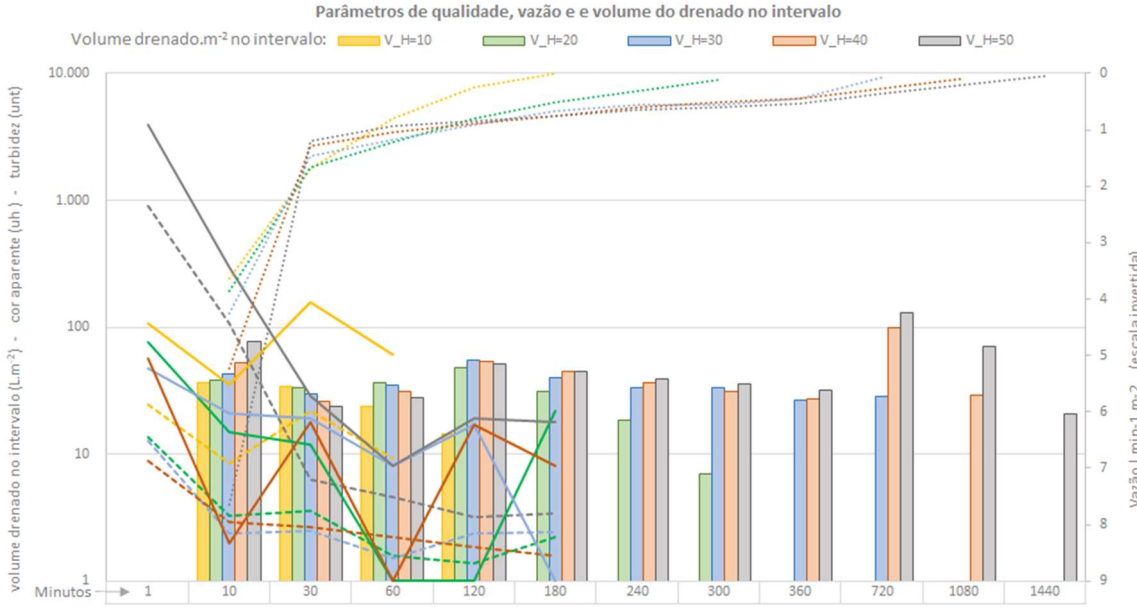
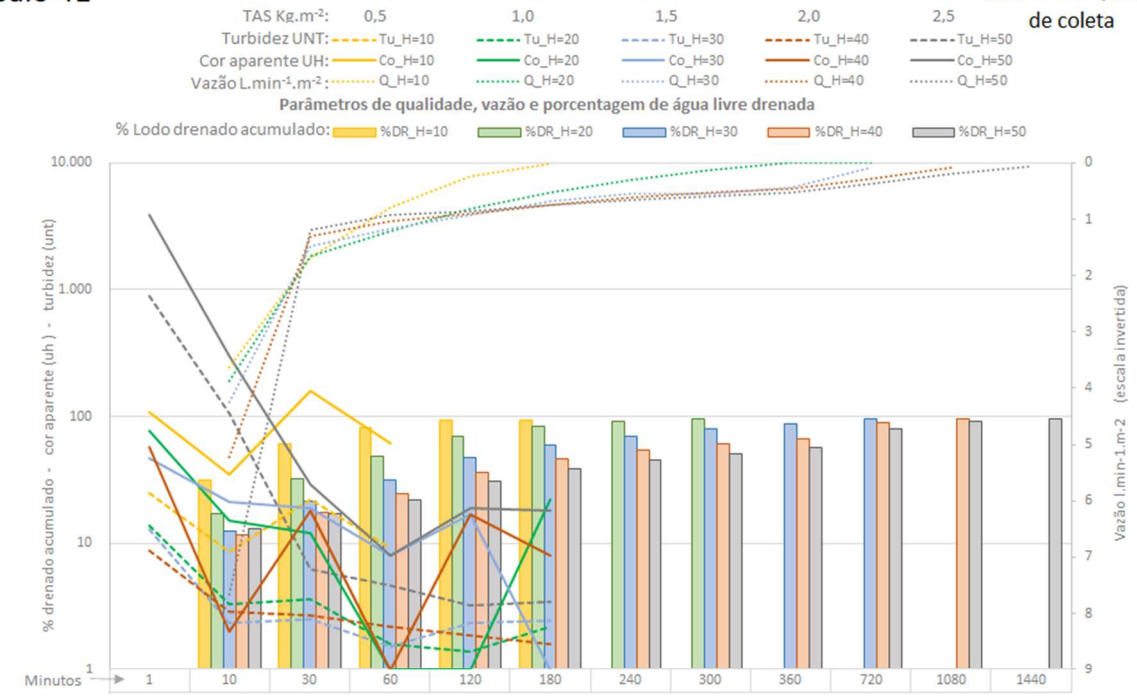


	1	10	30	60	120	180
h=10	6,51	6,61	6,62			
h=20	6,67	6,67	6,62	6,62	6,82	
h=30	6,62	6,66	6,57	6,5	6,63	6,39
h=40	6,63	6,73	6,74	6,91	6,81	6,59
h=50	6,85	6,84	6,91	6,91	6,76	6,59

Ensaio 41

Ensaio %ST=0,5 - geotêxtil 55/55 UV

Lodo 2ª Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

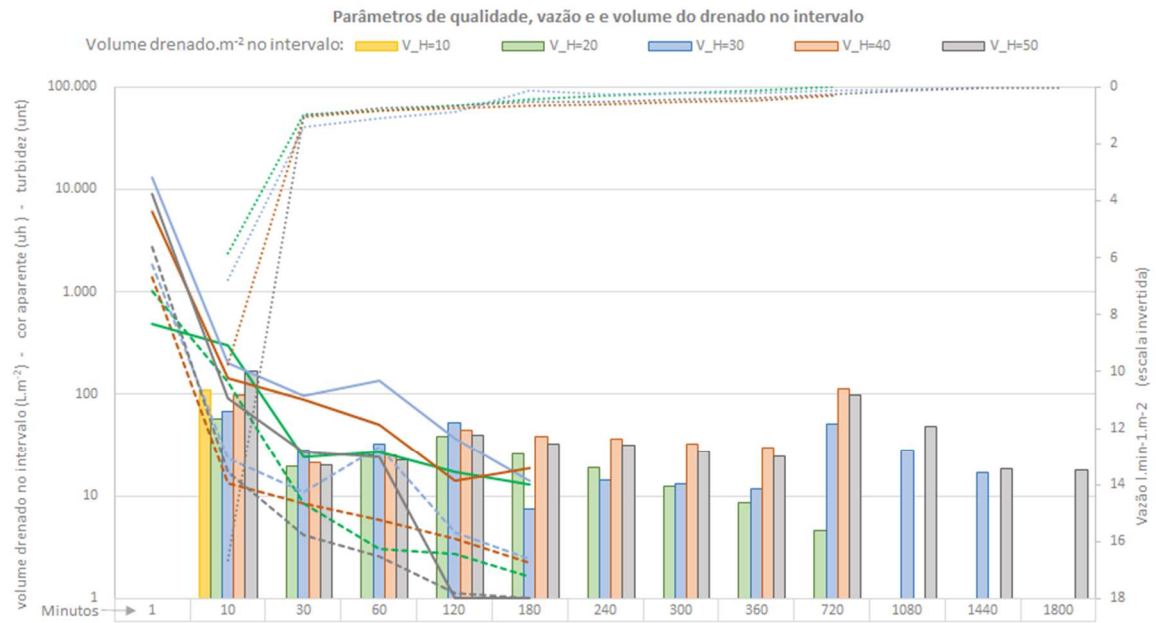
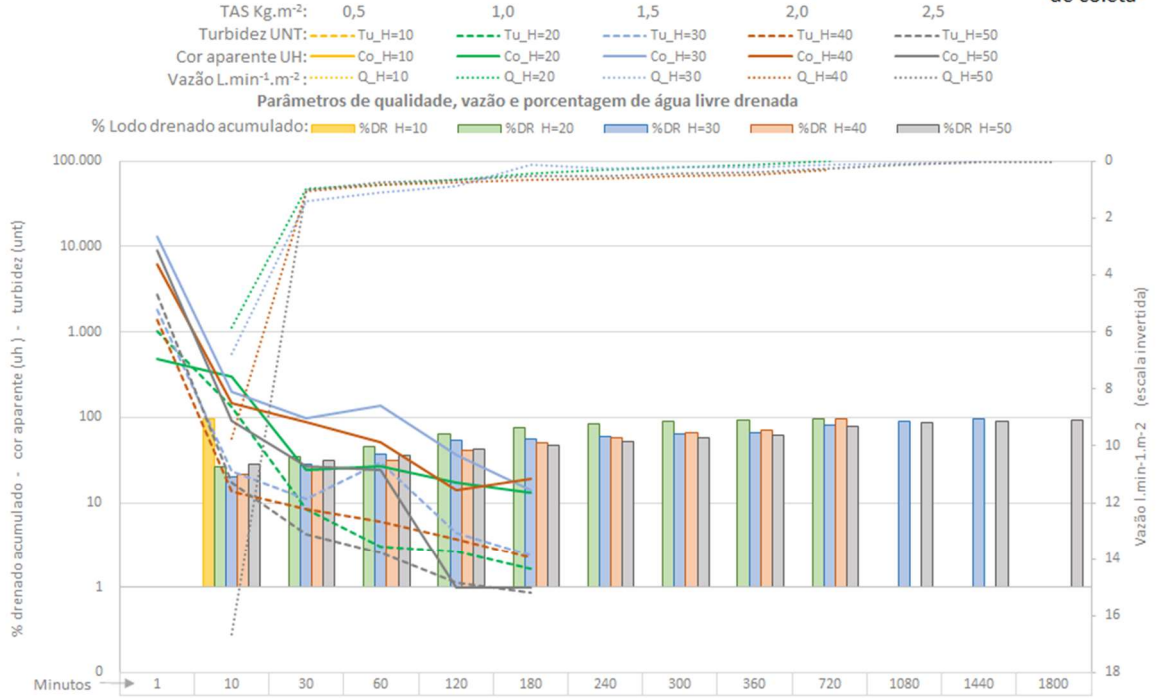


	1	10	30	60	120	180
h=10	6,8	6,84	6,84	6,9		
h=20	6,96	6,96	6,91	6,91	6,94	6,85
h=30	6,96	6,89	6,86	6,75	6,73	6,67
h=40	6,96	7	7	7,05	6,89	6,86
h=50	6,76	7,05	7,04	6,98	6,89	6,86

Ensaio 42

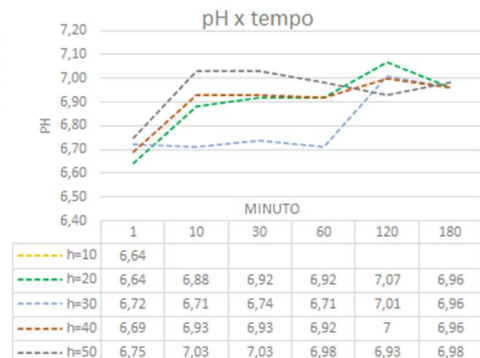
Ensaio %ST=0,5 - geotêxtil 105/105 DW

Lodo 2° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

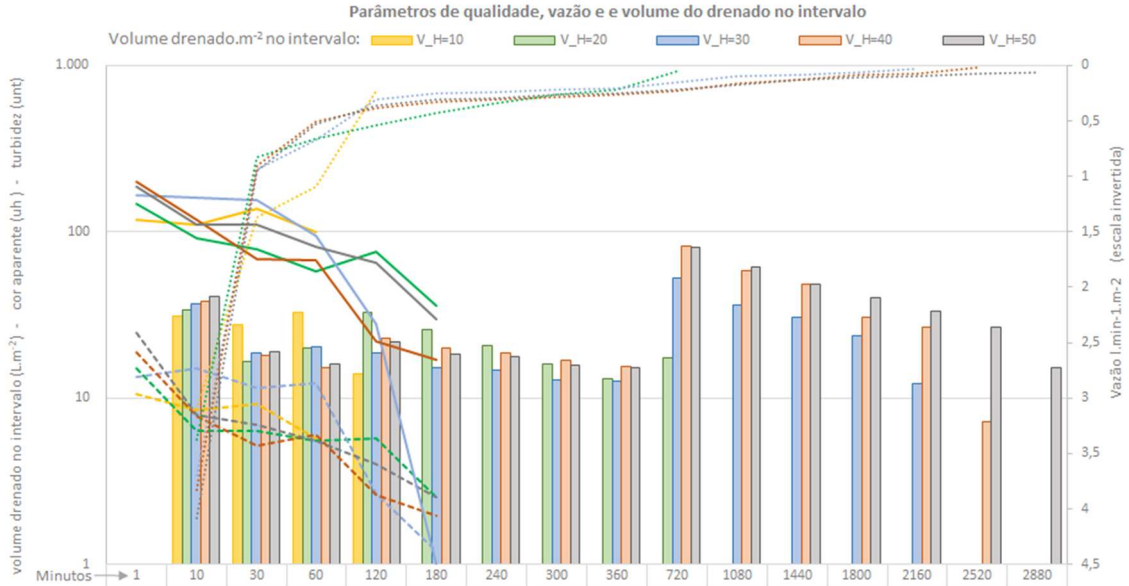
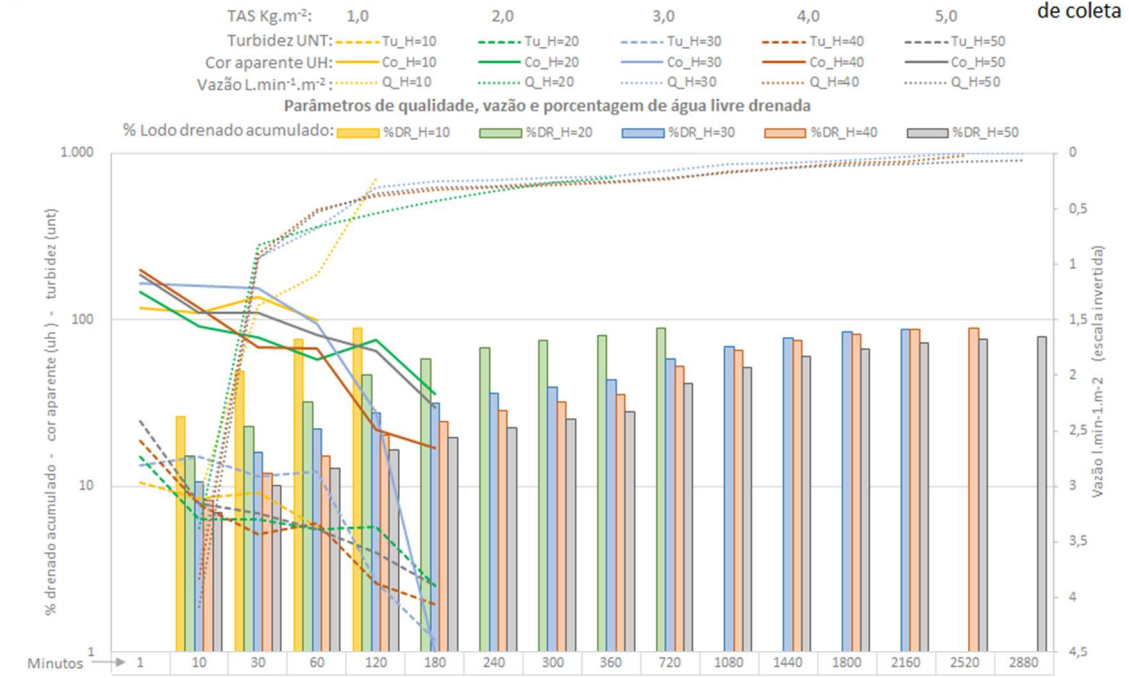
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 43

Ensaio %ST=1,0 - geotêxtil 600g.m⁻² NT

Lodo 2° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial

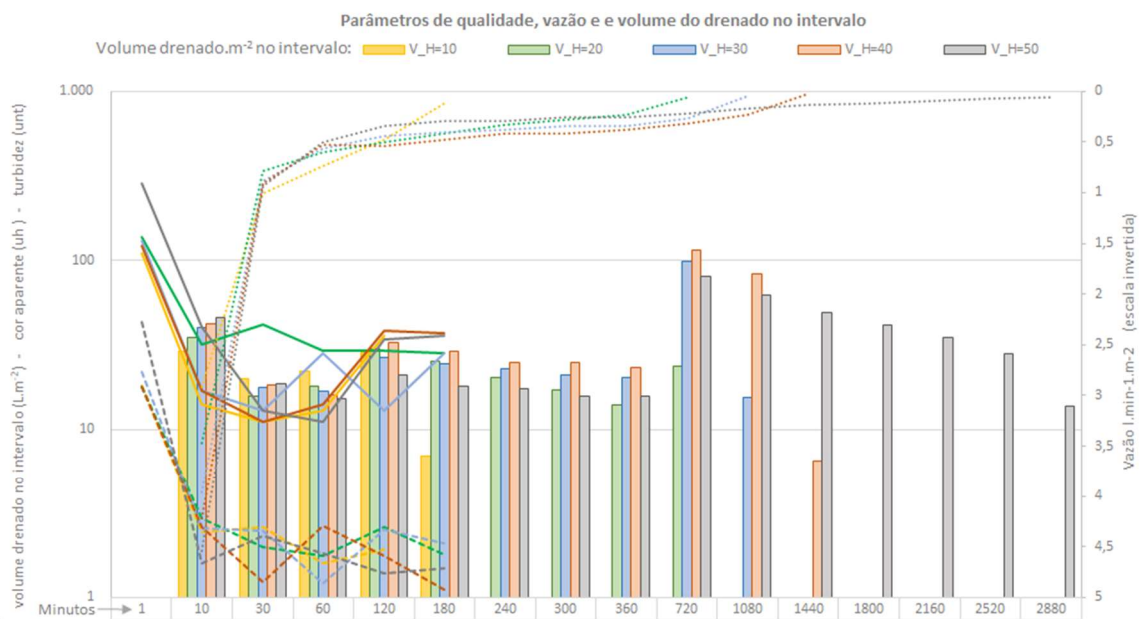
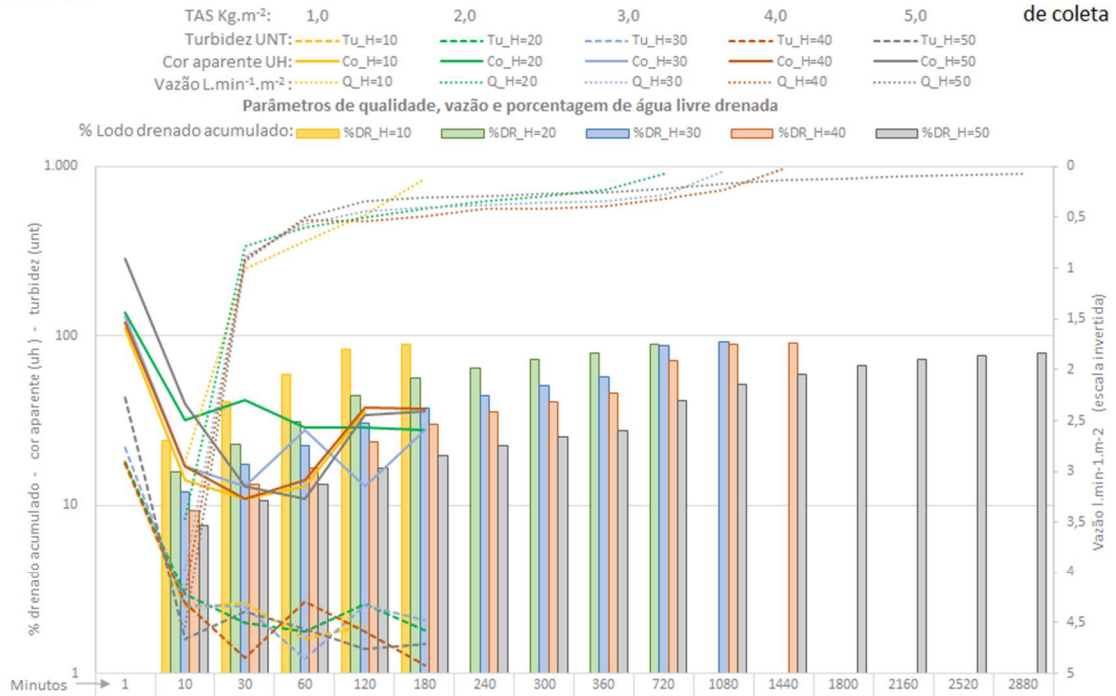
600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 44

Ensaio %ST=1,0 - geotêxtil 500g.m⁻² NT

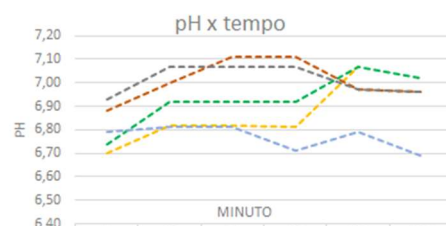
Lodo 2° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial

- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

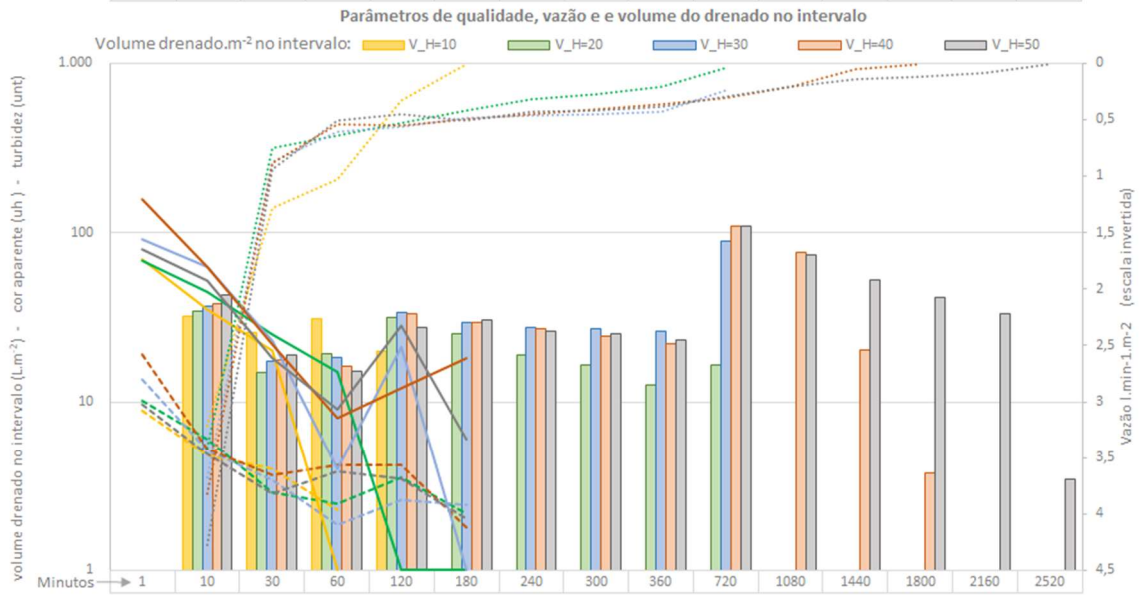
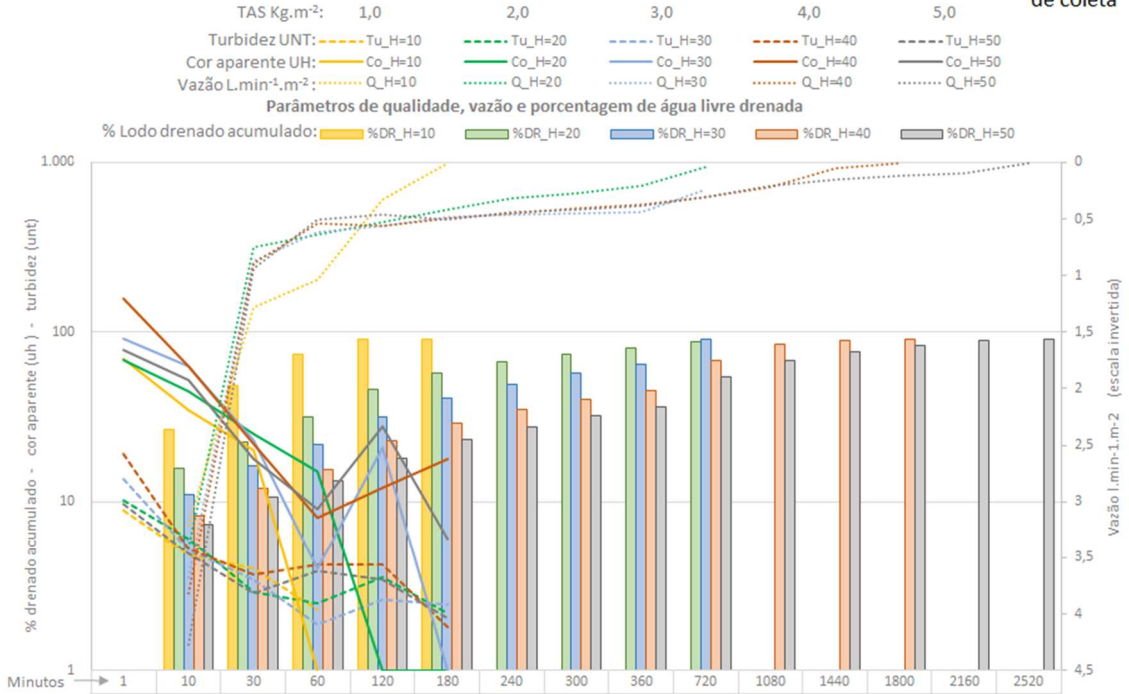


	MINUTO					
	1	10	30	60	120	180
h=10	6,7	6,82	6,82	6,81	7,07	
h=20	6,74	6,92	6,92	6,92	7,07	7,02
h=30	6,79	6,81	6,81	6,71	6,79	6,69
h=40	6,88	7	7,11	7,11	6,97	6,96
h=50	6,93	7,07	7,07	7,07	6,97	6,96

Ensaio 45

Ensaio %ST=1,0 - geotêxtil 400g.m⁻² NT

Lodo 2° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

pH x tempo

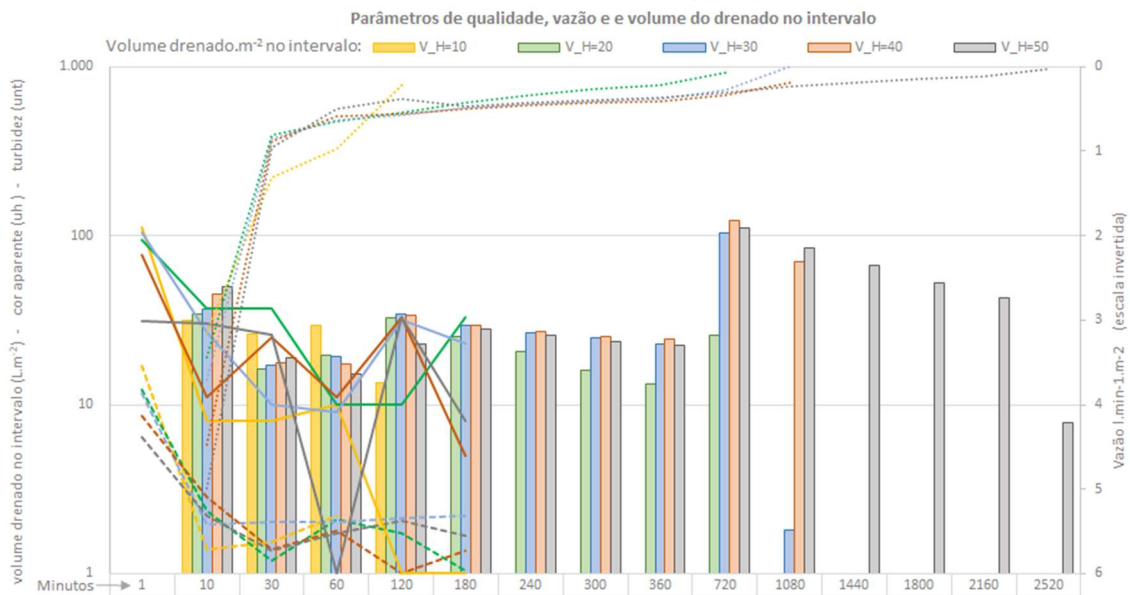
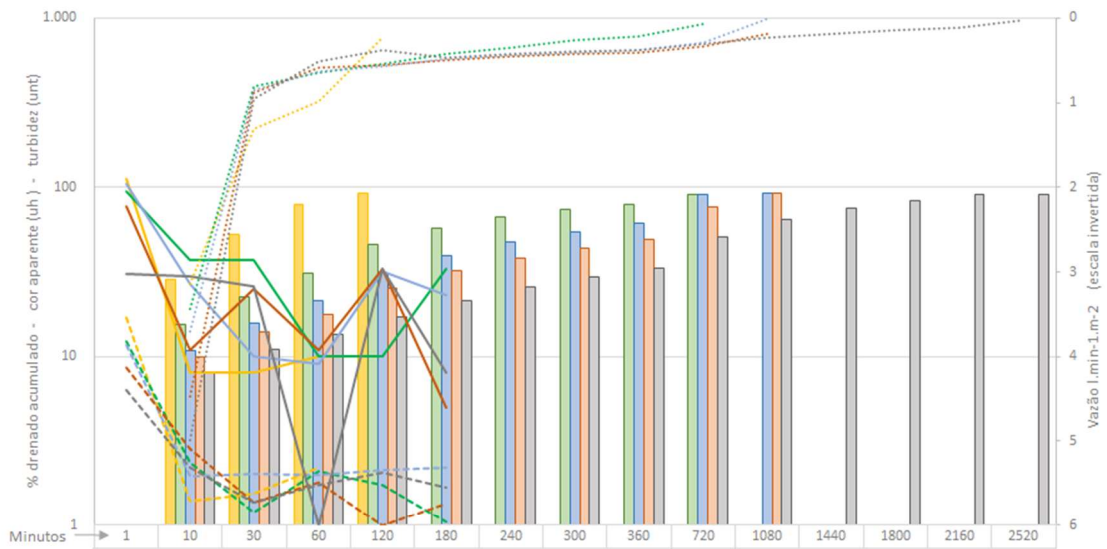


Ensaio 46

Ensaio %ST=1,0 - geotêxtil 300g.m⁻² NT

Lodo 2° Campanha de coleta

TAS Kg.m⁻²: 1,0 2,0 3,0 4,0 5,0
 Turbidez UNT: Tu_H=10 Tu_H=20 Tu_H=30 Tu_H=40 Tu_H=50
 Cor aparente UH: Co_H=10 Co_H=20 Co_H=30 Co_H=40 Co_H=50
 Vazão L.min⁻¹.m⁻²: Q_H=10 Q_H=20 Q_H=30 Q_H=40 Q_H=50
 Parâmetros de qualidade, vazão e porcentagem de água livre drenada
 % Lodo drenado acumulado: %DR_H=10 %DR_H=20 %DR_H=30 %DR_H=40 %DR_H=50

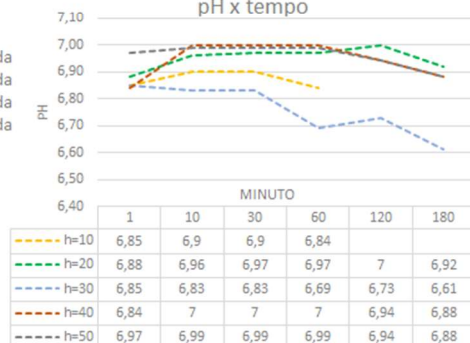


Legenda Siglas:

%DR = % Lodo drenado acumulado
 Tu = Turbidez (UNT)
 Co = Cor aparente (UH)
 Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 ST = % de sólidos totais inicial

600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

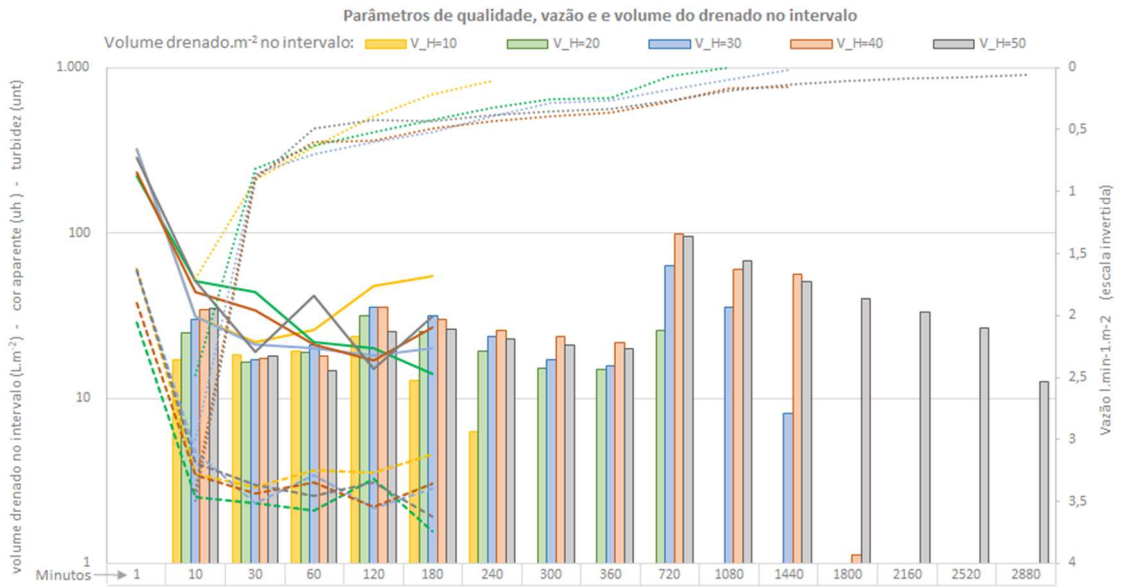
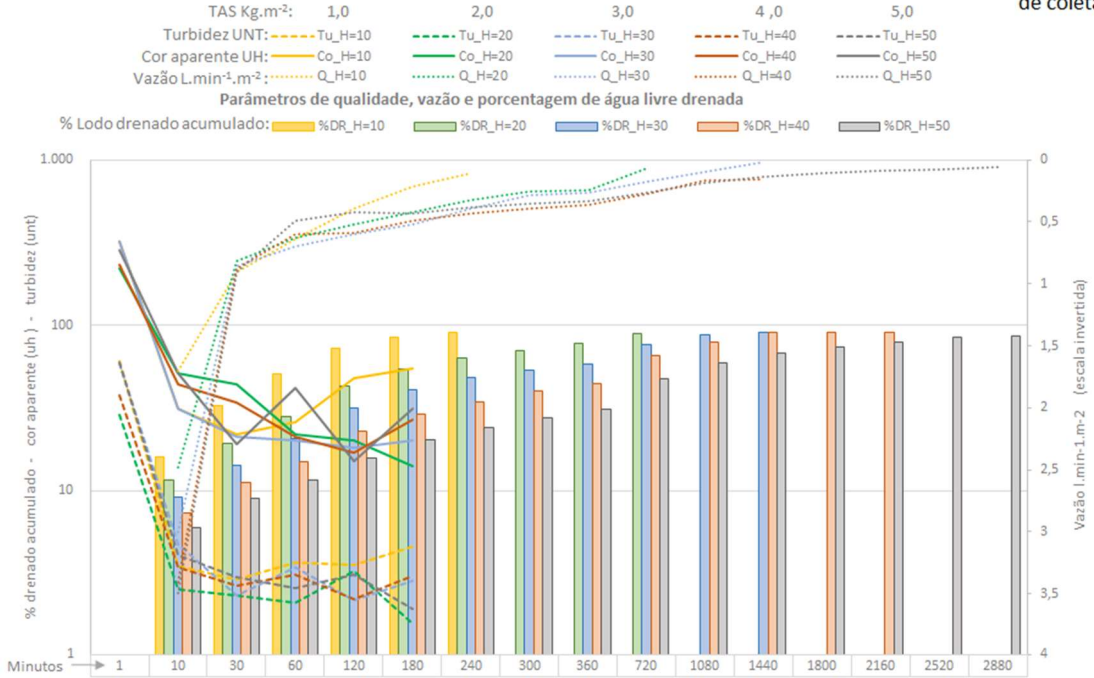
pH x tempo



Ensaio 47

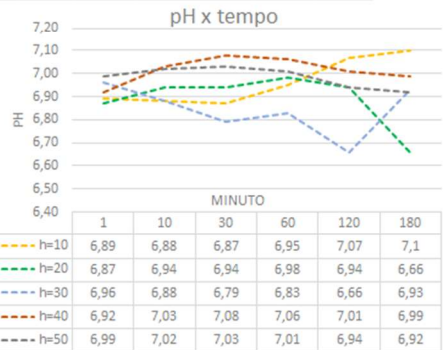
Ensaio %ST=1,0 - geotêxtil 55/55 UV

Lodo 2° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

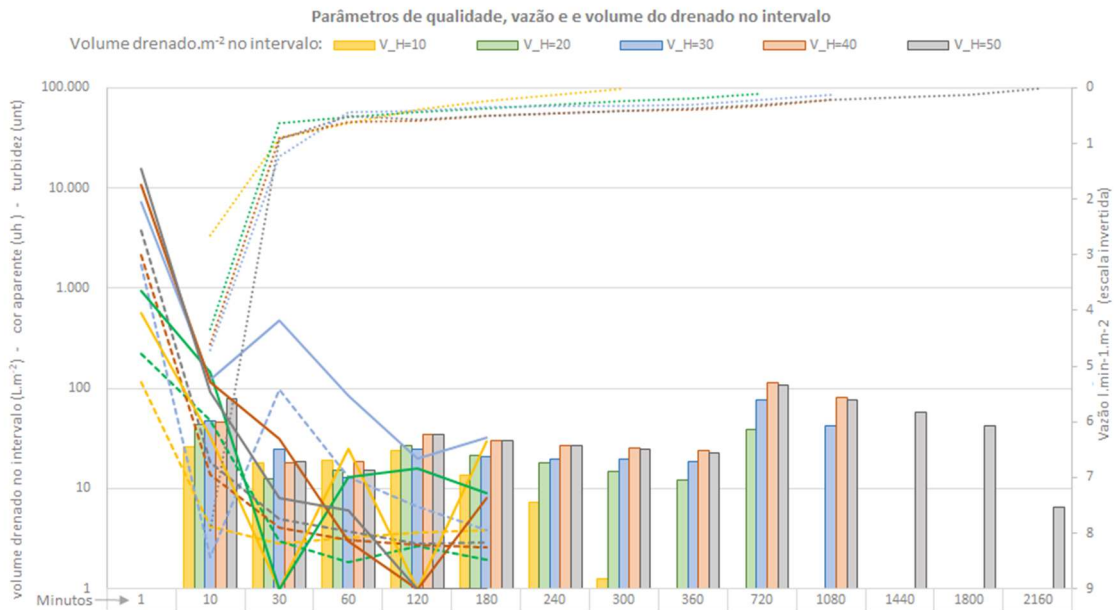
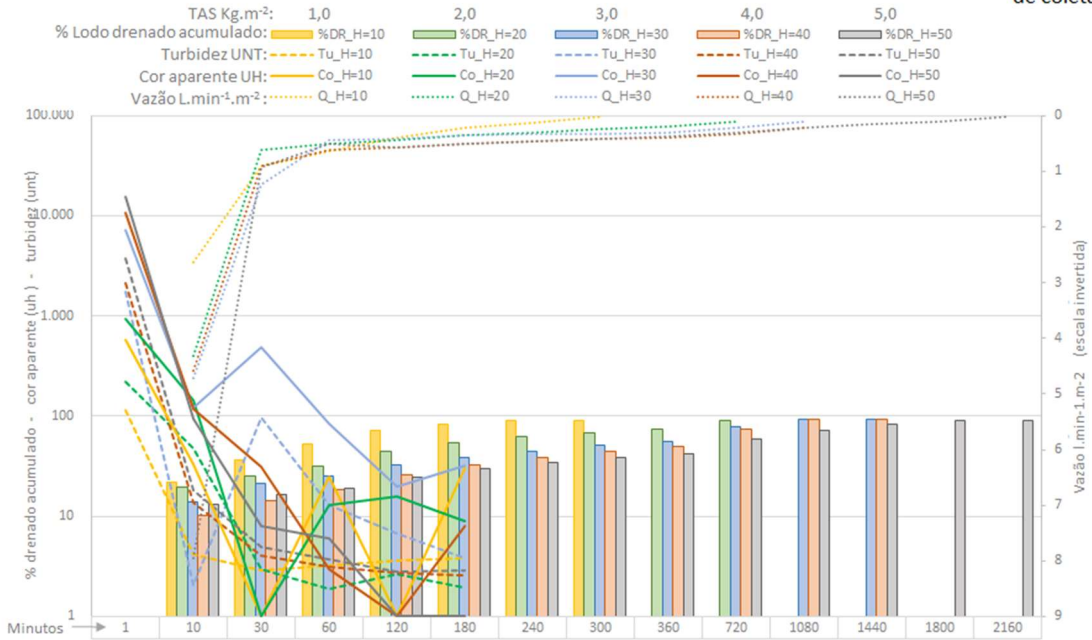
%DR = % Lodo drenado acumulado 600 = Geotêxtil de 600g.m² não tecida
 Tu = Turbidez (UNT) 500 = Geotêxtil de 500g.m² não tecida
 Co = Cor aparente (UH) 400 = Geotêxtil de 400g.m² não tecida
 Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²) 300 = Geotêxtil de 300g.m² não tecida
 V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²) 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm) 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida
 Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 ST = % de sólidos totais inicial



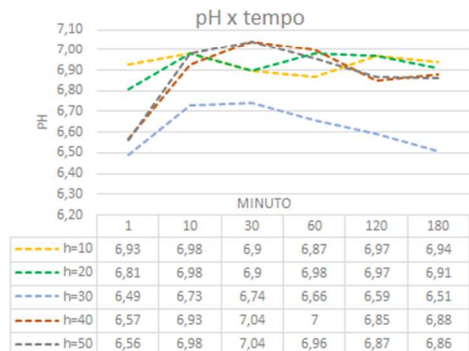
Ensaio 48

Ensaio %ST=1,0 - geotêxtil 105/105 DW

Lodo 2° Campanha de coleta



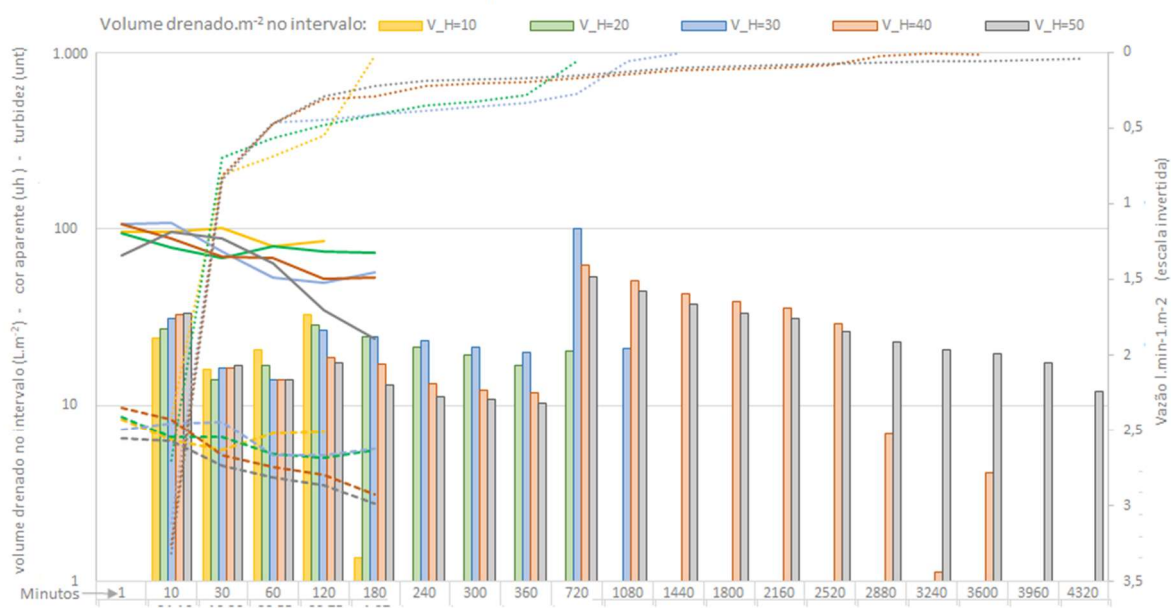
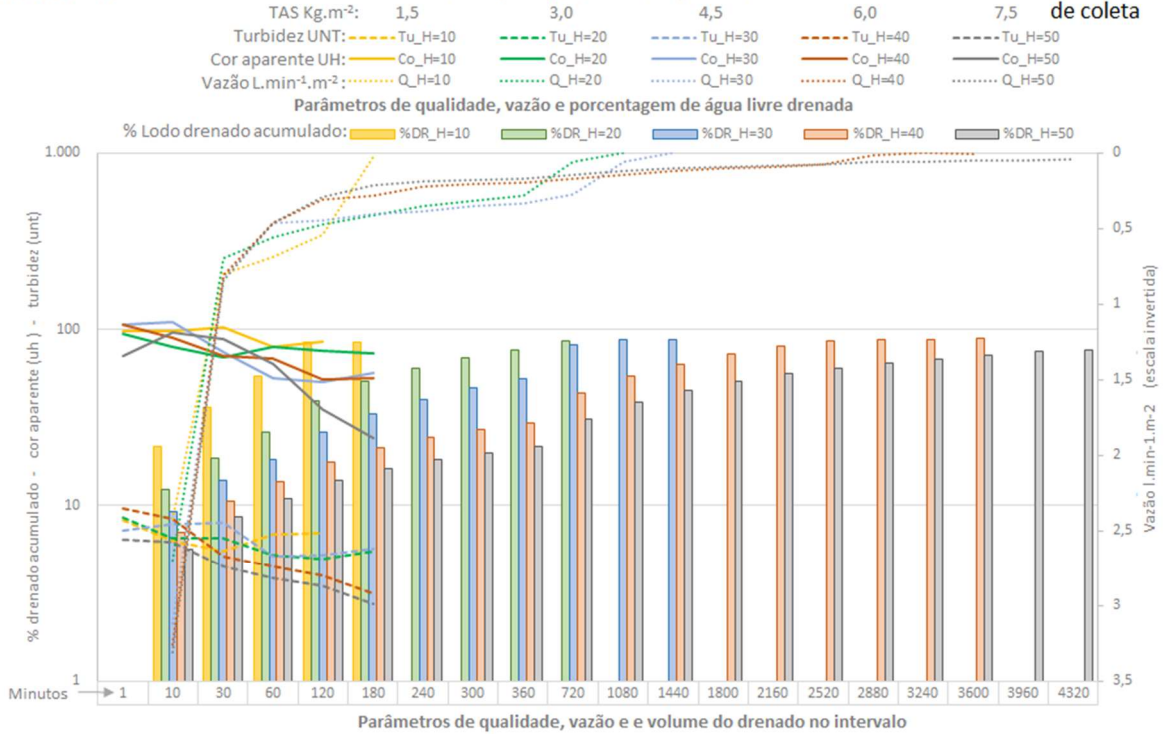
- Legenda Siglas:**
- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - Tu = Turbidez (UNT)
 - Co = Cor aparente (UH)
 - Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 - ST = % de sólidos totais inicial
 - 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



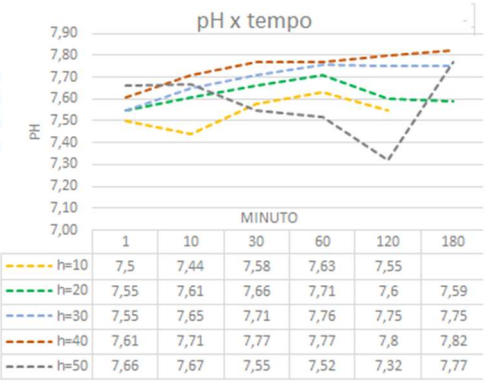
Ensaio 49

Ensaio %ST=1,5 - geotêxtil 600g.m² NT

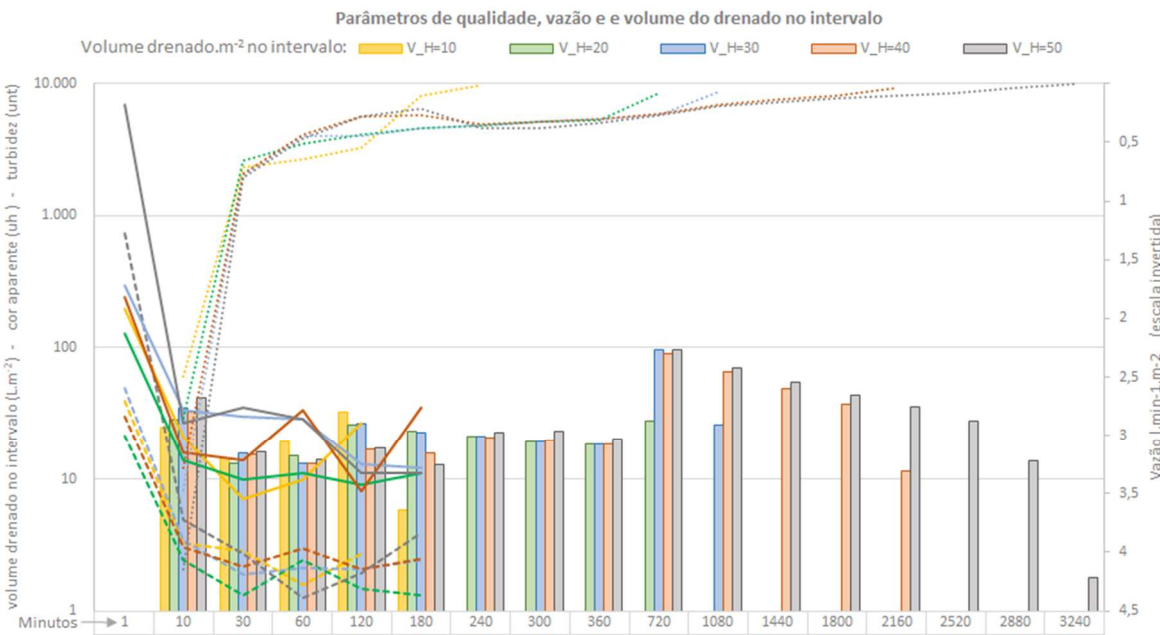
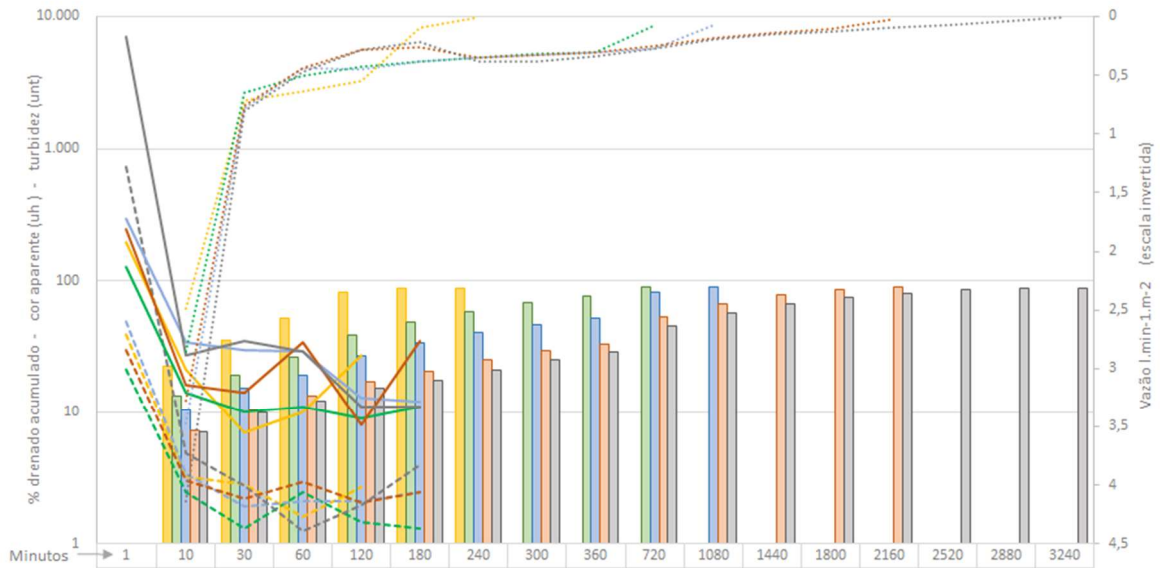
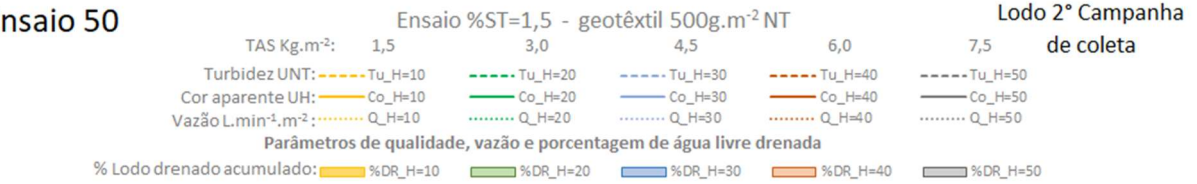
Lodo 2° Campanha de coleta



- Legenda Siglas:**
- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - Tu = Turbidez (UNT)
 - Co = Cor aparente (UH)
 - Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
 - ST = % de solidos totais inicial
 - 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



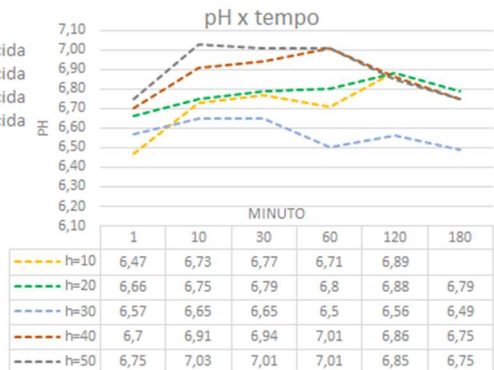
Ensaio 50



Legenda Siglas:

%DR = % Lodo drenado acumulado
 Tu = Turbidez (UNT)
 Co = Cor aparente (UH)
 Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 ST = % de sólidos totais inicial

600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



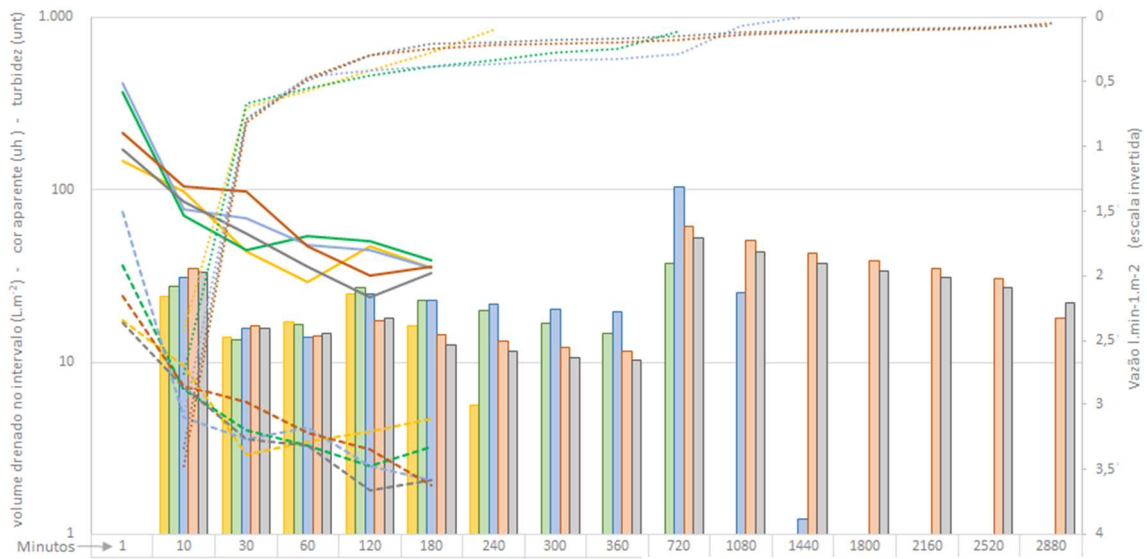
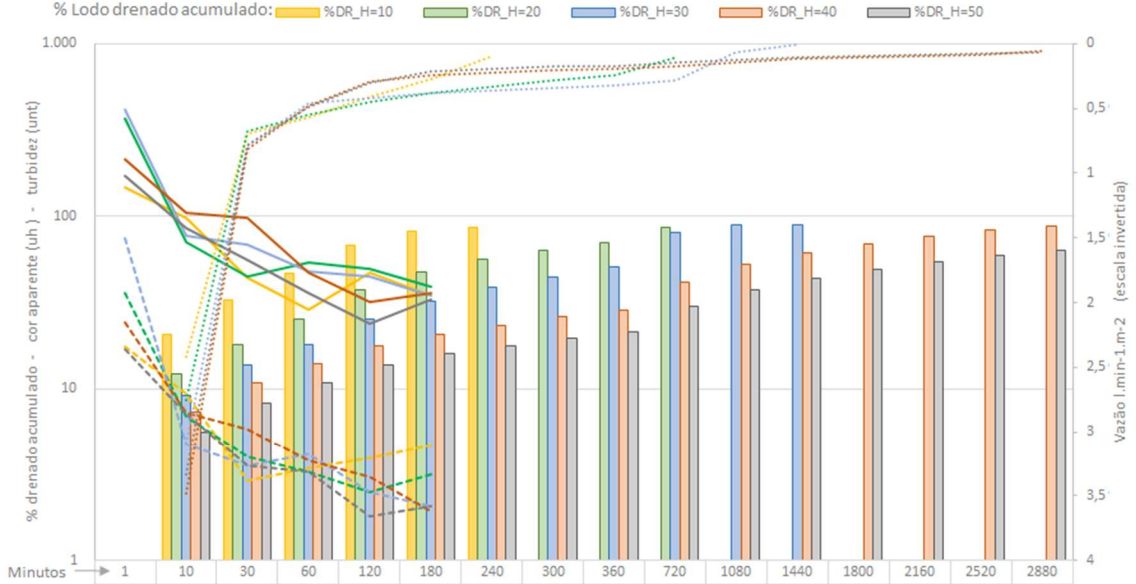
Ensaio 51

Ensaio %ST=1,5 - geotêxtil 400g.m⁻² NT

Lodo 2° Campanha de coleta

TAS Kg.m⁻²: 1,5 3,0 4,5 6,0 7,5
 Turbidez UNT: Tu_H=10 Tu_H=20 Tu_H=30 Tu_H=40 Tu_H=50
 Cor aparente UH: Co_H=10 Co_H=20 Co_H=30 Co_H=40 Co_H=50
 Vazão L.min⁻¹.m⁻²: Q_H=10 Q_H=20 Q_H=30 Q_H=40 Q_H=50

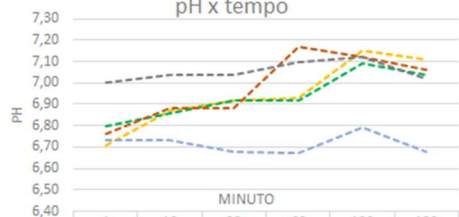
Parâmetros de qualidade, vazão e porcentagem de água livre drenada



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

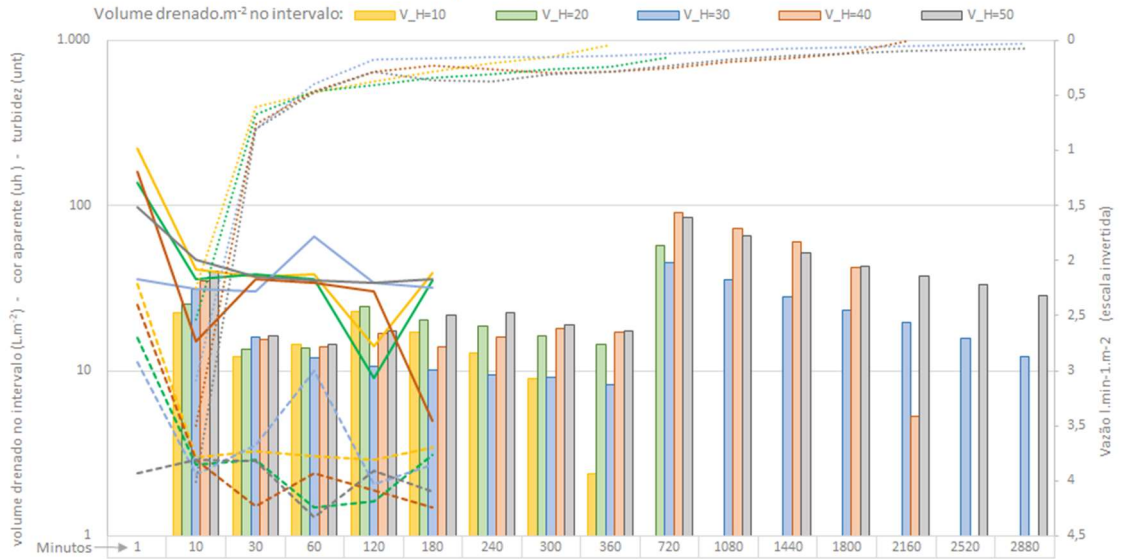
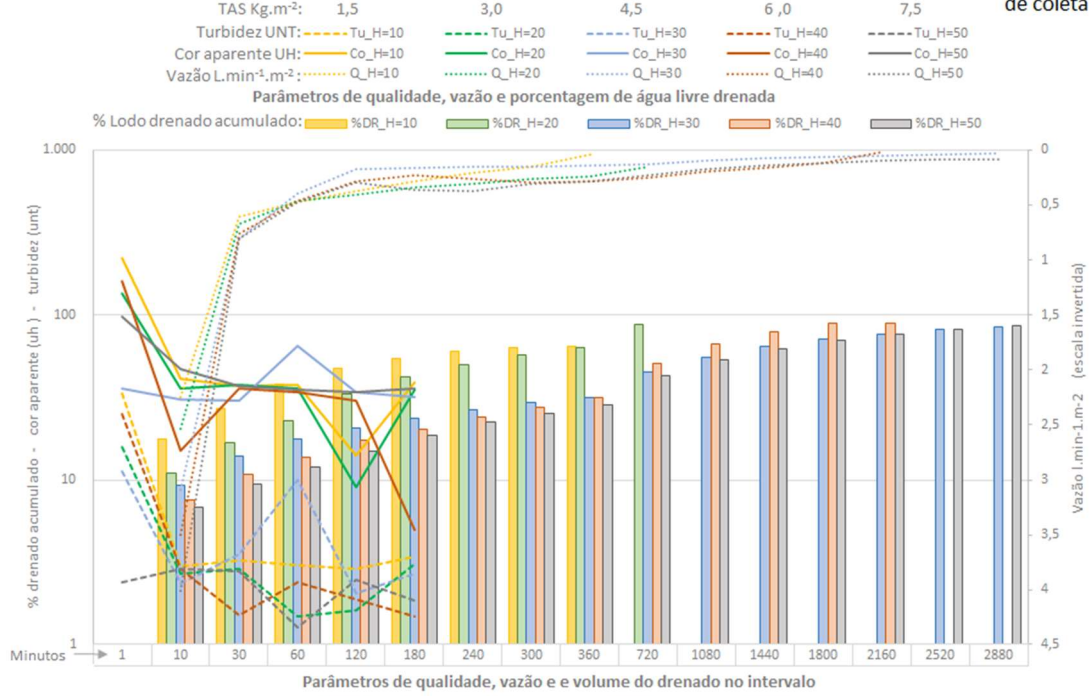
pH x tempo



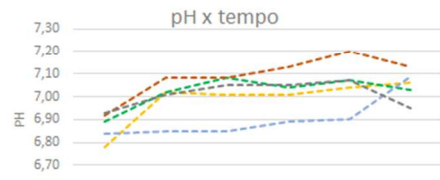
Ensaio 52

Ensaio %ST=1,5 - geotêxtil 300g.m⁻² NT

Lodo 2° Campanha de coleta



- Legenda Siglas:**
- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - Tu = Turbidez (UNT)
 - Co = Cor aparente (UH)
 - Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 - ST = % de sólidos totais inicial
 - 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

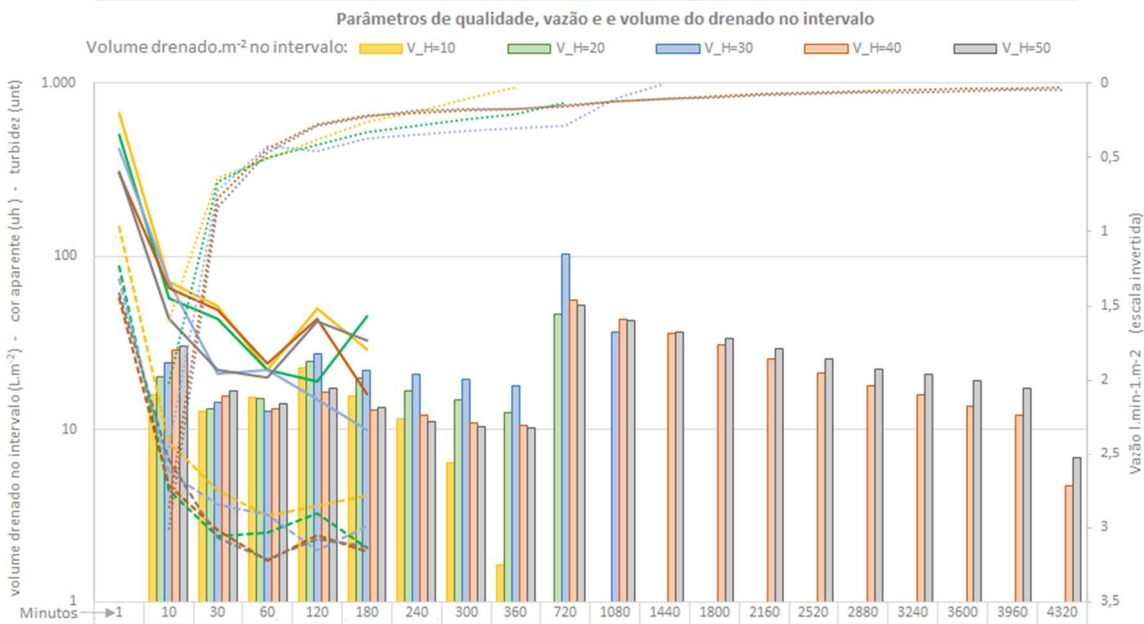
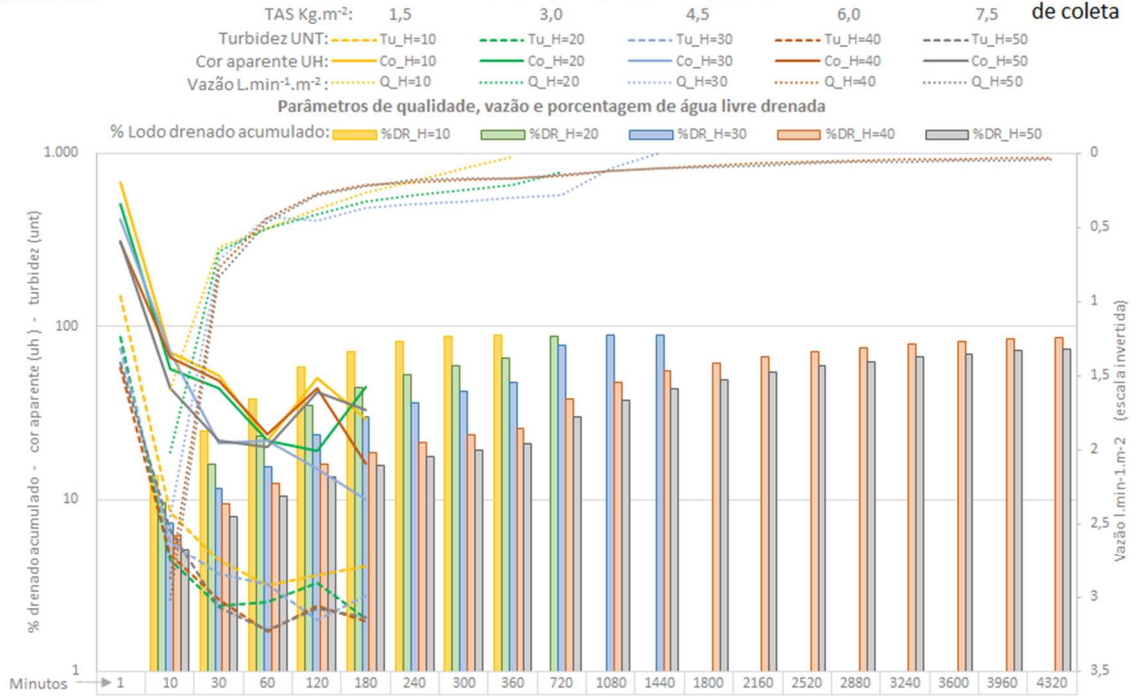


	MINUTO					
	1	10	30	60	120	180
h=10	6,78	7,02	7,01	7,01	7,04	7,06
h=20	6,89	7,02	7,08	7,04	7,07	7,03
h=30	6,84	6,85	6,85	6,89	6,9	7,09
h=40	6,92	7,08	7,08	7,13	7,2	7,13
h=50	6,93	7,01	7,05	7,05	7,07	6,95

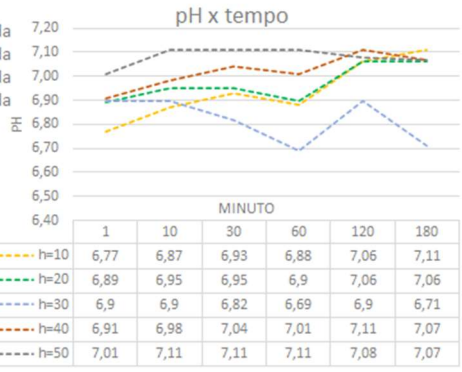
Ensaio 53

Ensaio %ST=1,5 - geotêxtil 55/55 UV

Lodo 2° Campanha de coleta



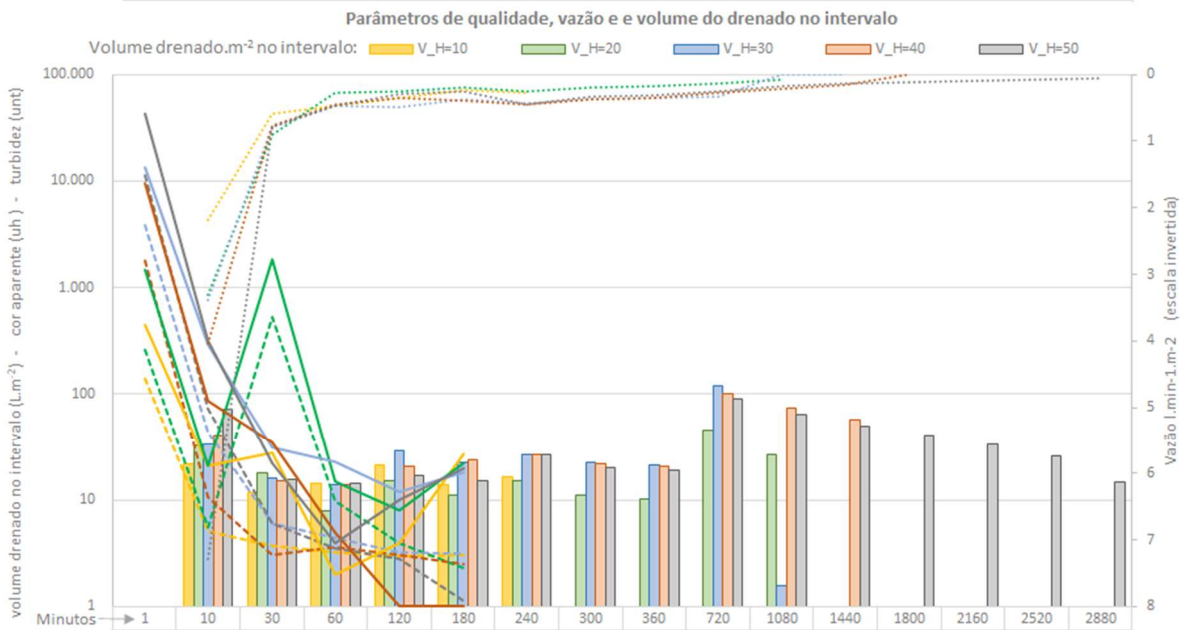
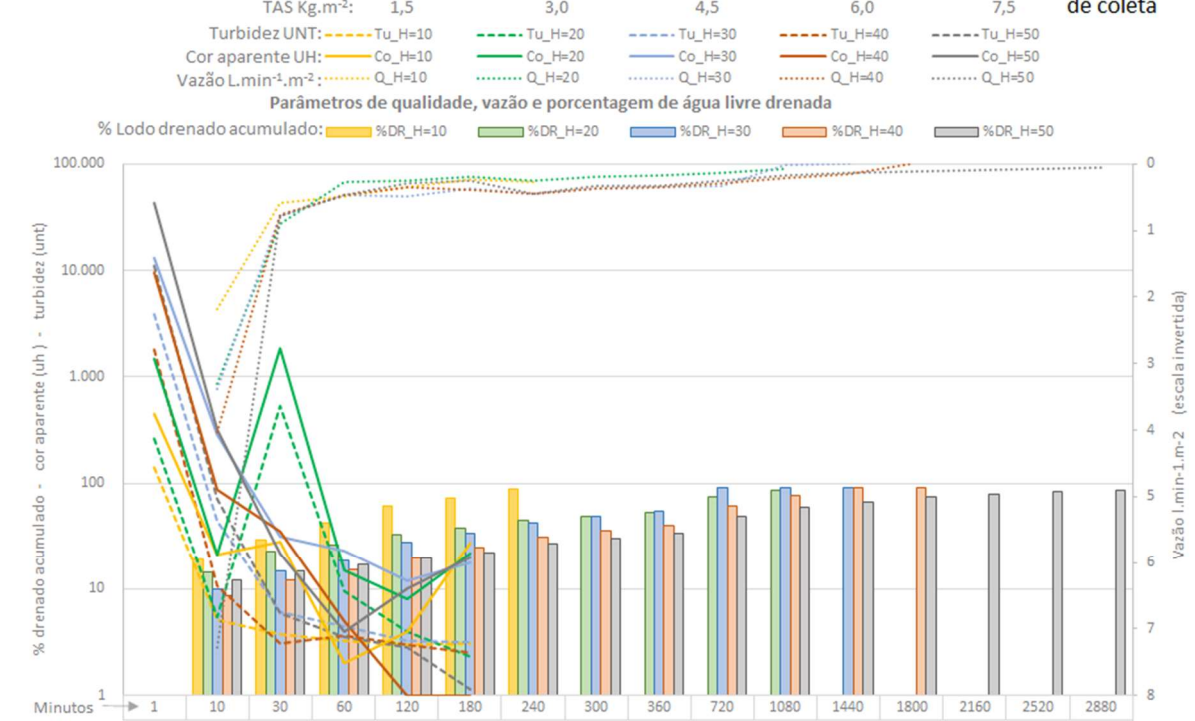
- Legenda Siglas:
- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - Tu = Turbidez (UNT)
 - Co = Cor aparente (UH)
 - Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 - ST = % de sólidos totais inicial
 - 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 54

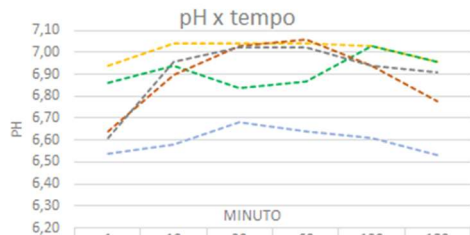
Ensaio %ST=1,5 - geotêxtil 105/105 DW

Lodo 2ª Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

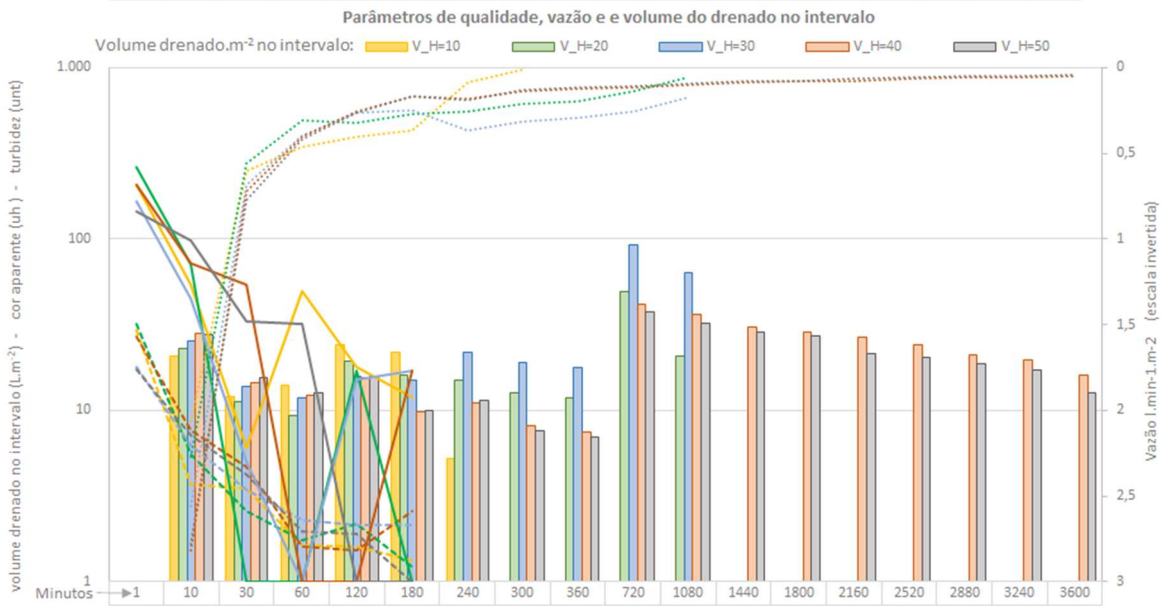
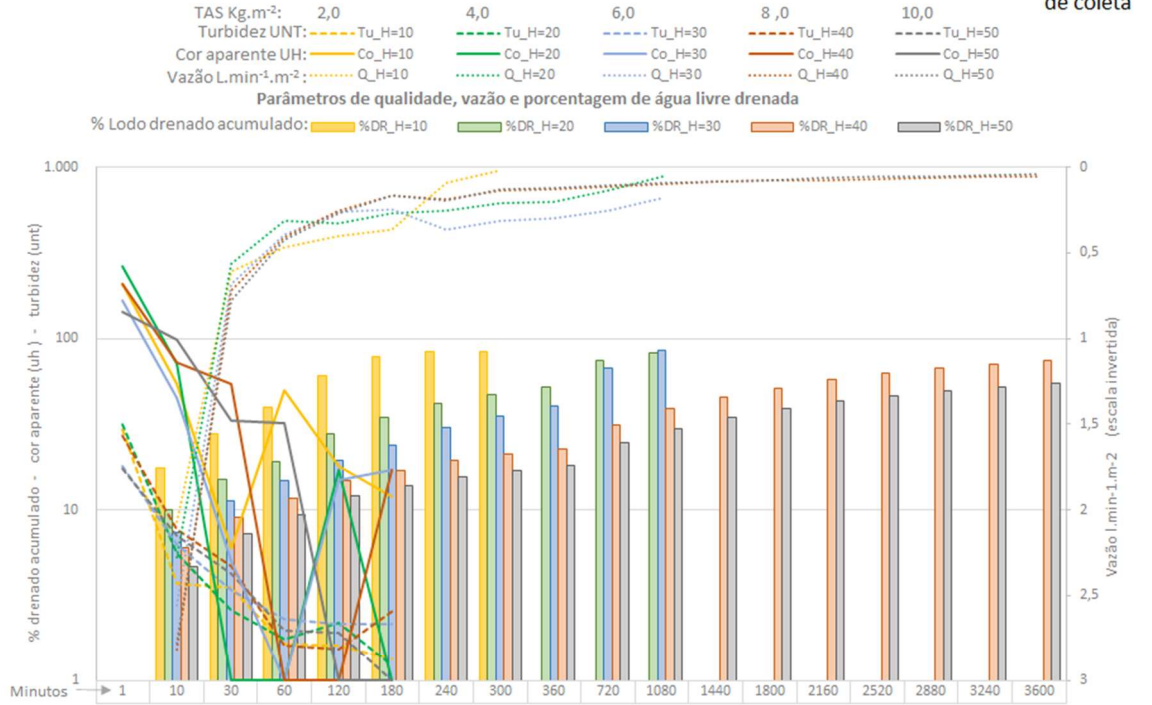


	MINUTO					
	1	10	30	60	120	180
h=10	6,94	7,04	7,04	7,04	7,03	6,96
h=20	6,86	6,94	6,84	6,87	7,03	6,96
h=30	6,54	6,58	6,68	6,64	6,61	6,53
h=40	6,64	6,9	7,03	7,06	6,94	6,78
h=50	6,61	6,96	7,02	7,02	6,94	6,91

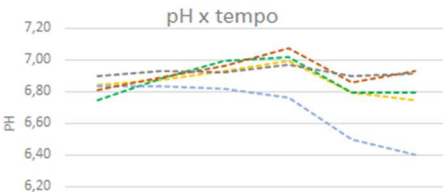
Ensaio 55

Ensaio %ST=2,0 - geotêxtil 600g.m⁻² NT

Lodo 2° Campanha de coleta

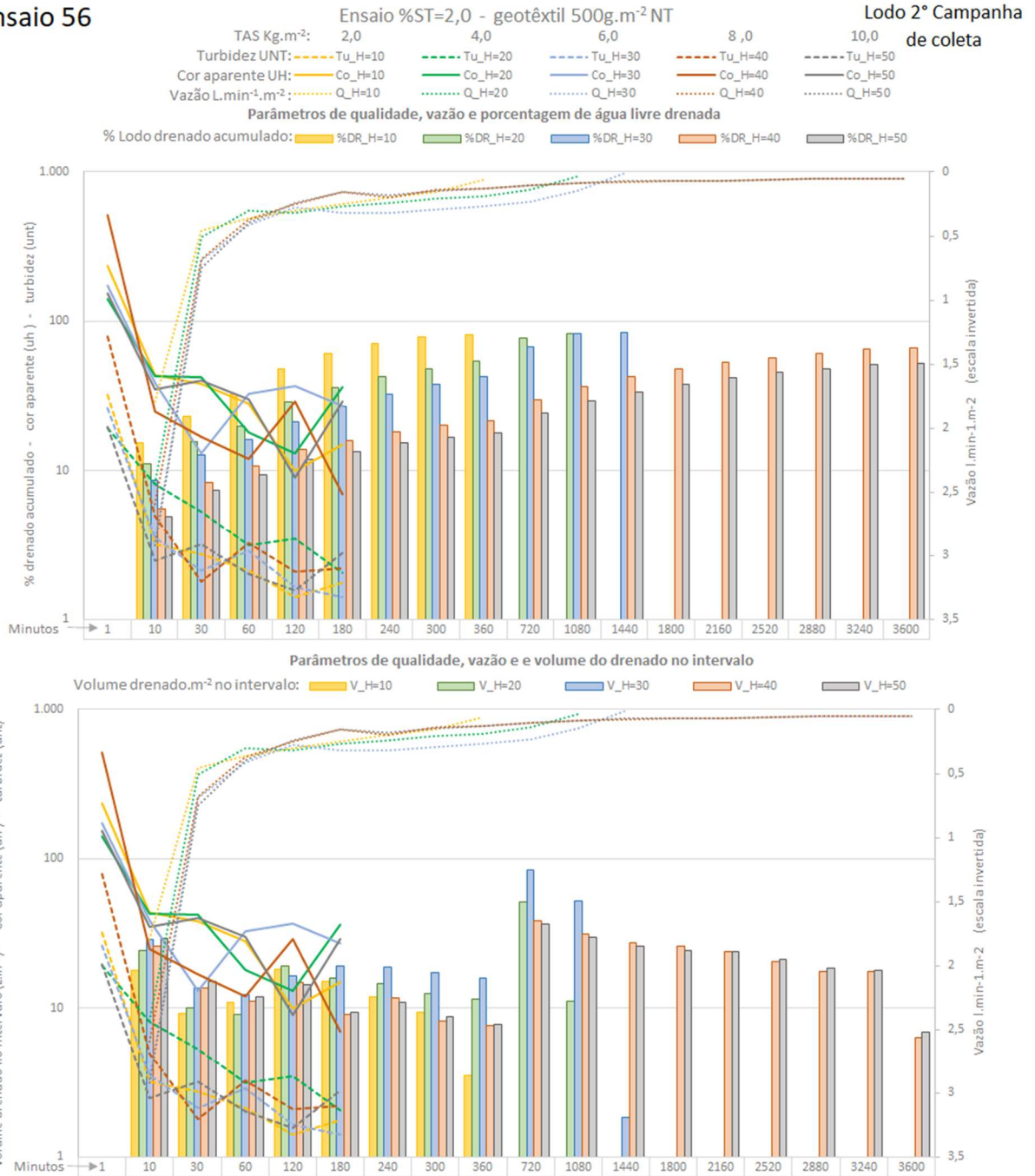


Legenda Siglas:
 %DR = % Lodo drenado acumulado
 Tu = Turbidez (UNT)
 Co = Cor aparente (UH)
 Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 ST = % de sólidos totais inicial



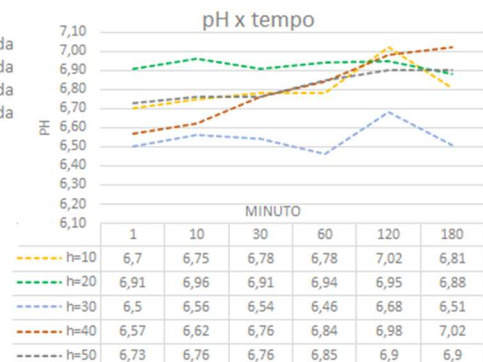
	MINUTO					
	1	10	30	60	120	180
h=10	6,84	6,87	6,93	6,99	6,79	6,75
h=20	6,75	6,88	6,99	7,02	6,79	6,79
h=30	6,83	6,83	6,82	6,76	6,5	6,4
h=40	6,81	6,89	6,96	7,07	6,86	6,93
h=50	6,9	6,93	6,92	6,97	6,9	6,91

Ensaio 56



Legenda Siglas:

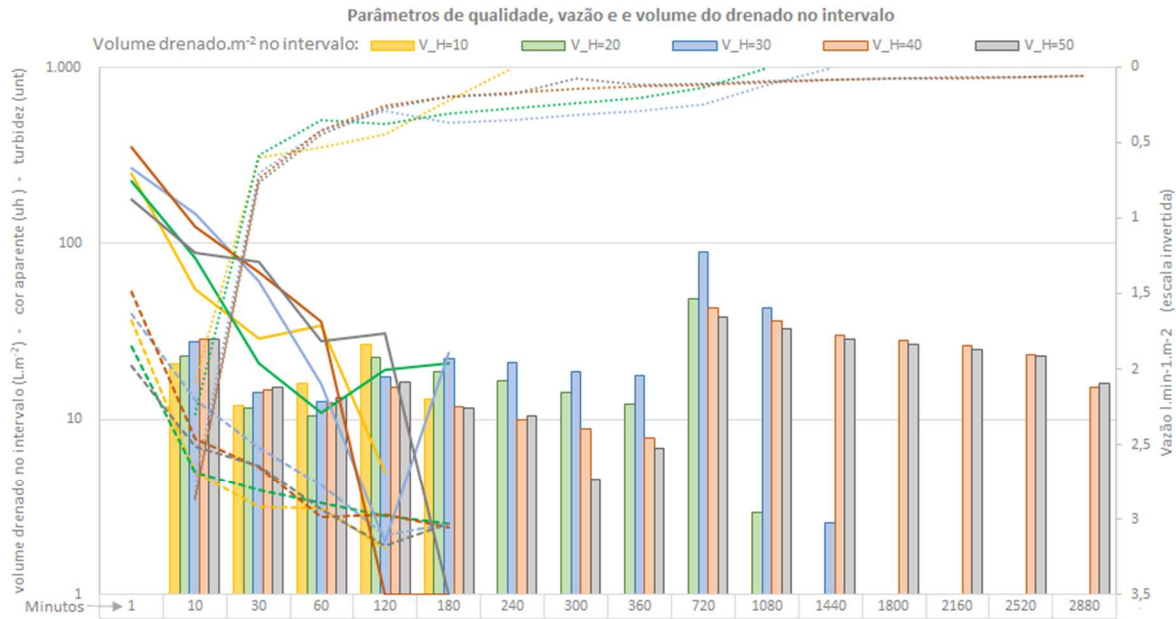
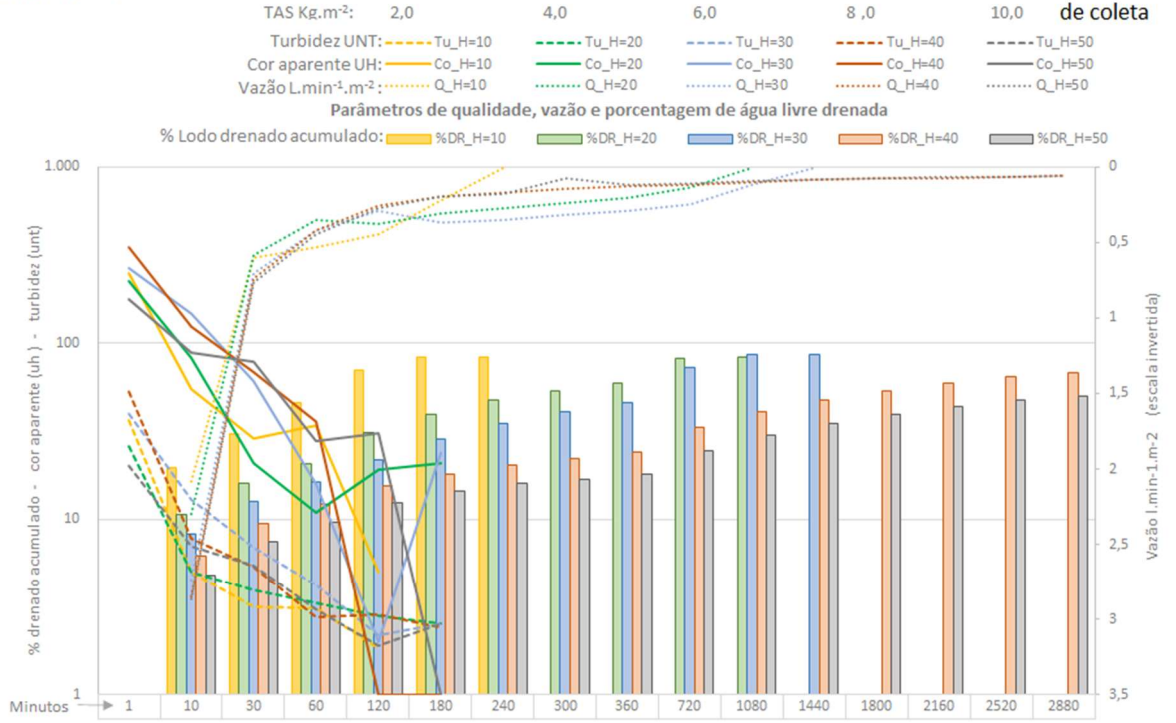
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 57

Ensaio %ST=2,0 - geotêxtil 400g.m⁻² NT

Lodo 2° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

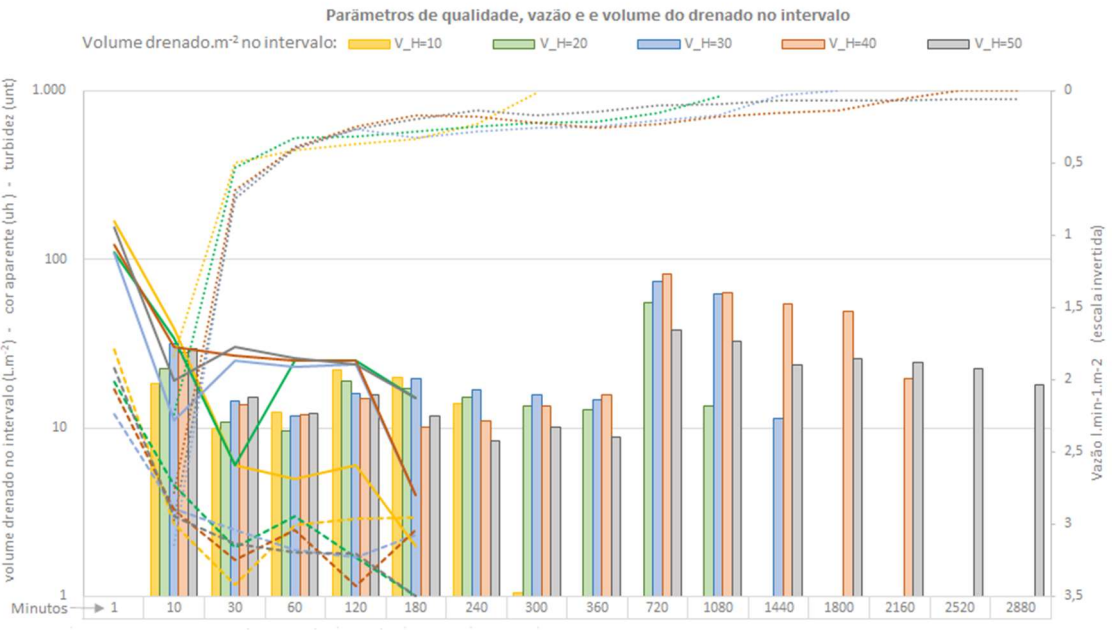
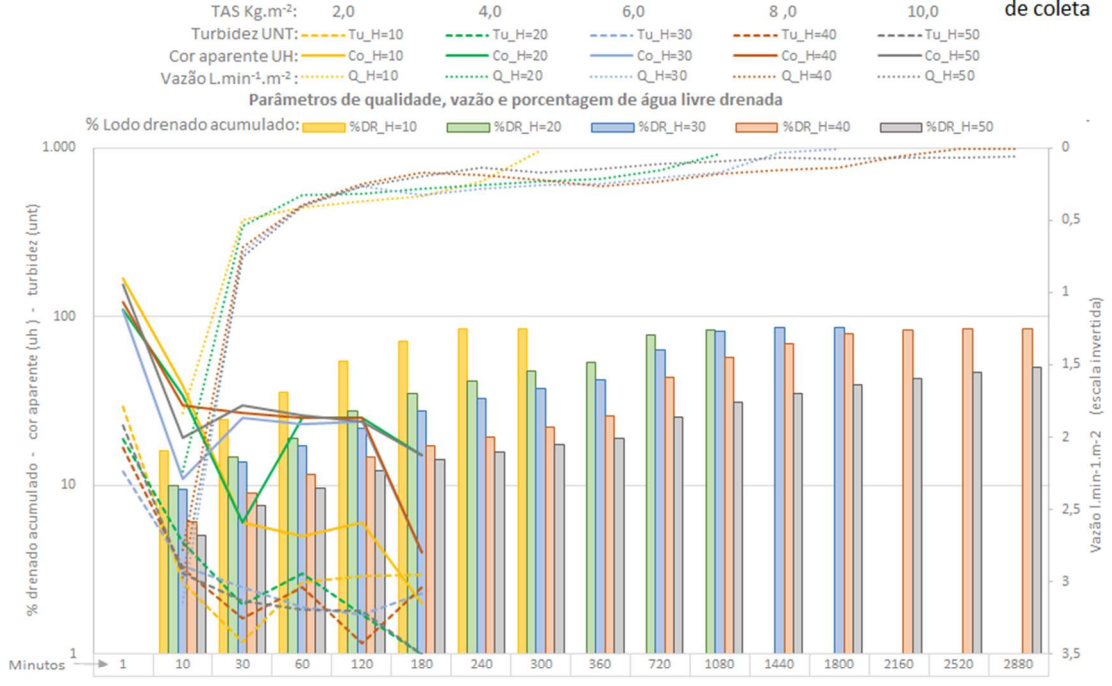
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 58

Ensaio %ST=2,0 - geotêxtil 300g.m² NT

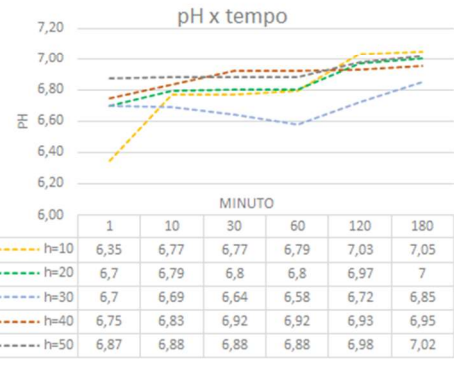
Lodo 2° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial

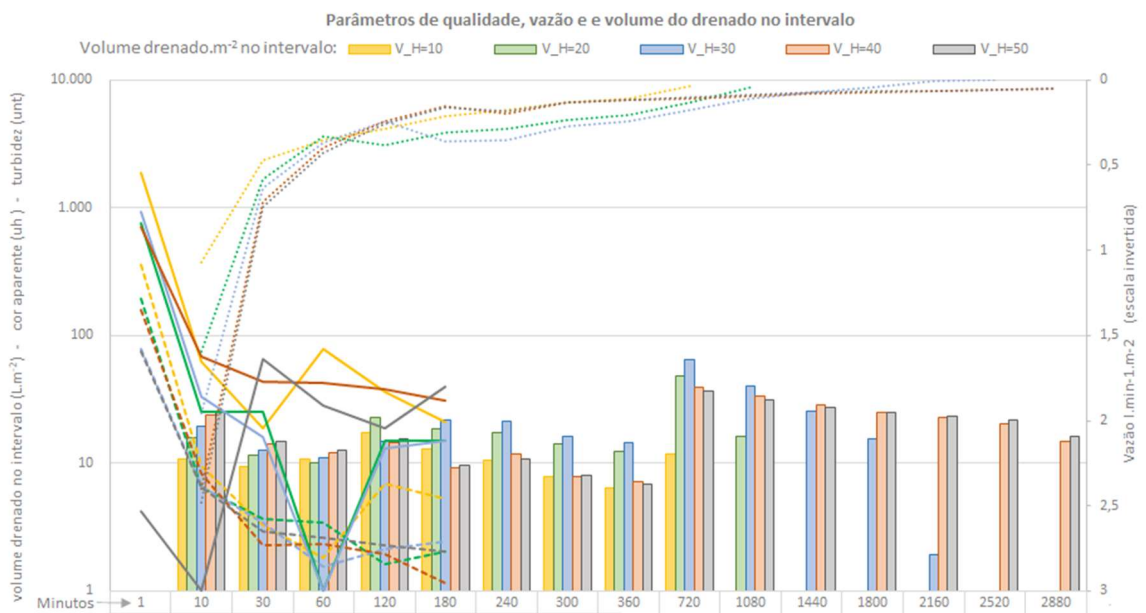
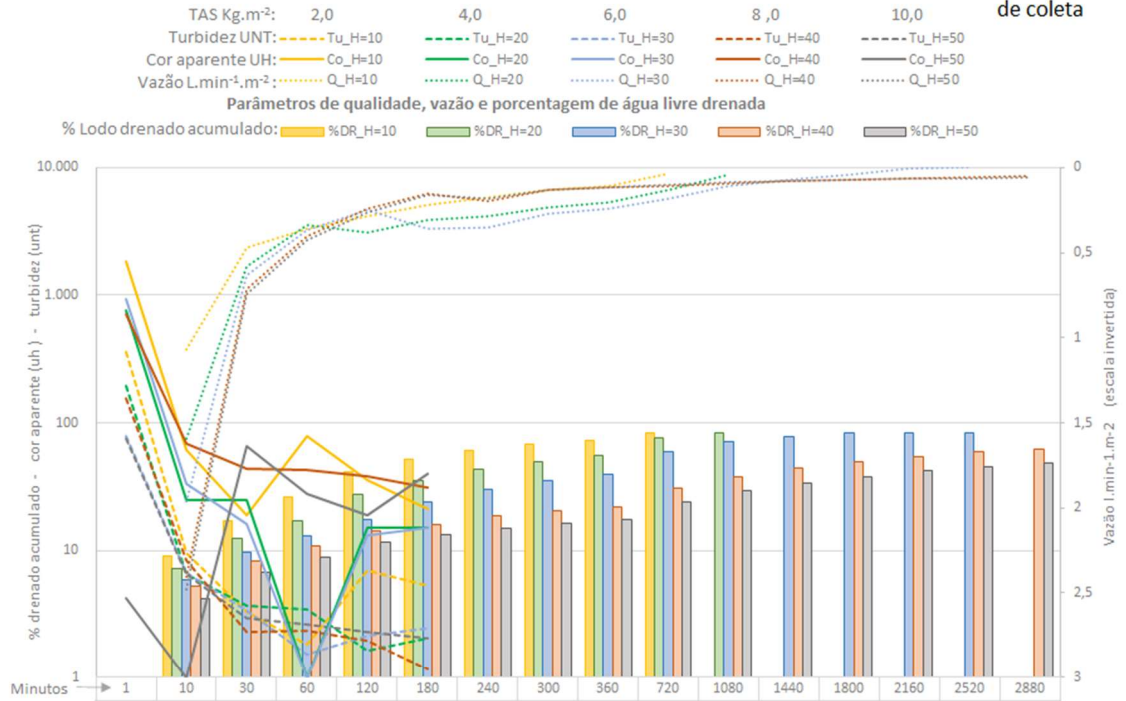
- 600 = Geotêxtil de 600g.m² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



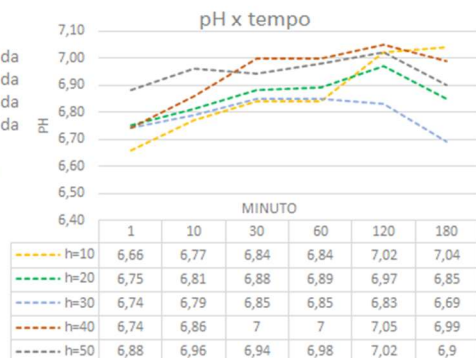
Ensaio 59

Ensaio %ST=2,0 - geotêxtil 55/55 UV

Lodo 2° Campanha de coleta



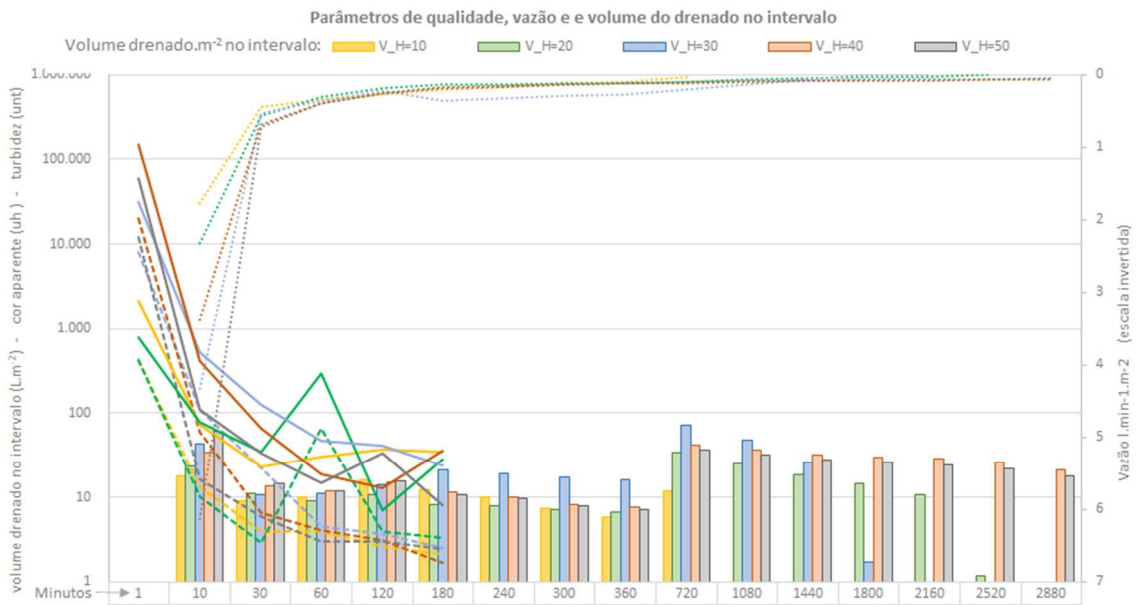
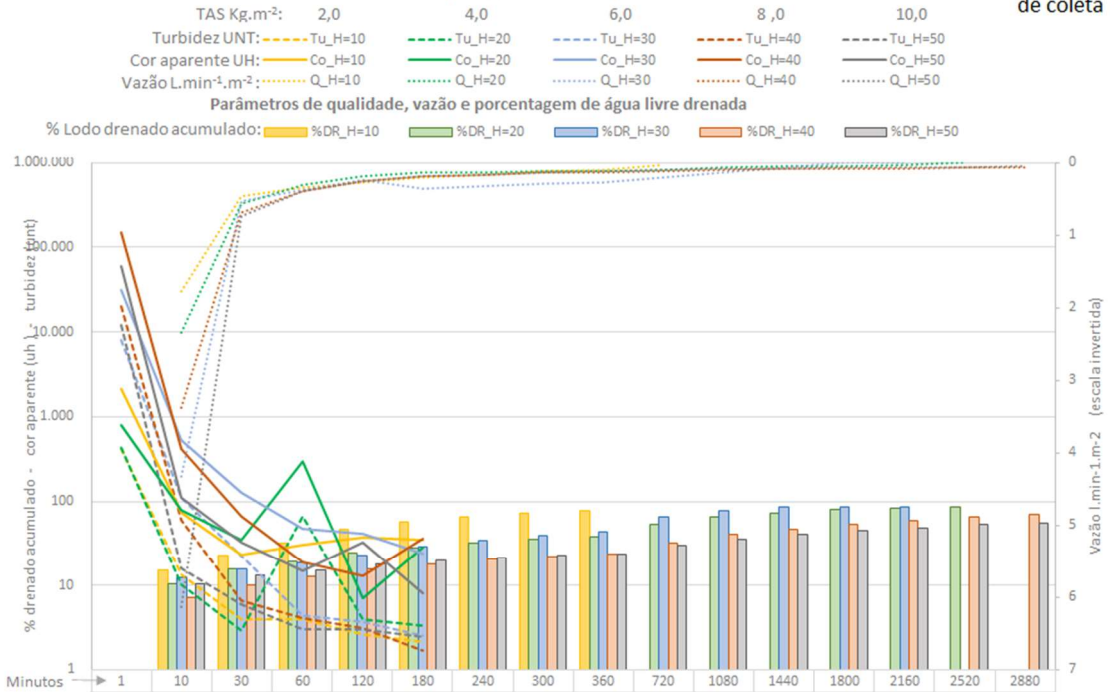
- Legenda Siglas:**
- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - Tu = Turbidez (UNT)
 - Co = Cor aparente (UH)
 - Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 - ST = % de sólidos totais inicial
 - 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



Ensaio 60

Ensaio %ST=2,0 - geotêxtil 105/105 DW

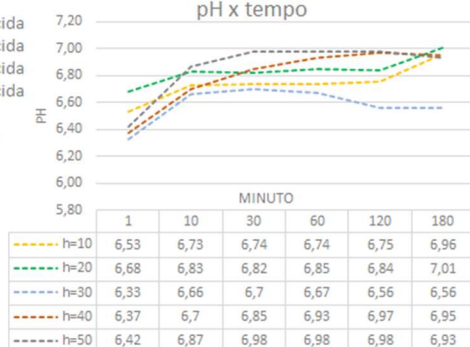
Lodo 2° Campanha de coleta



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - u = Turbidez (UNT)
 - o = Cor aparente (UH)
 - λ = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - γ = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - f(x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - a = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 - T = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

pH x tempo

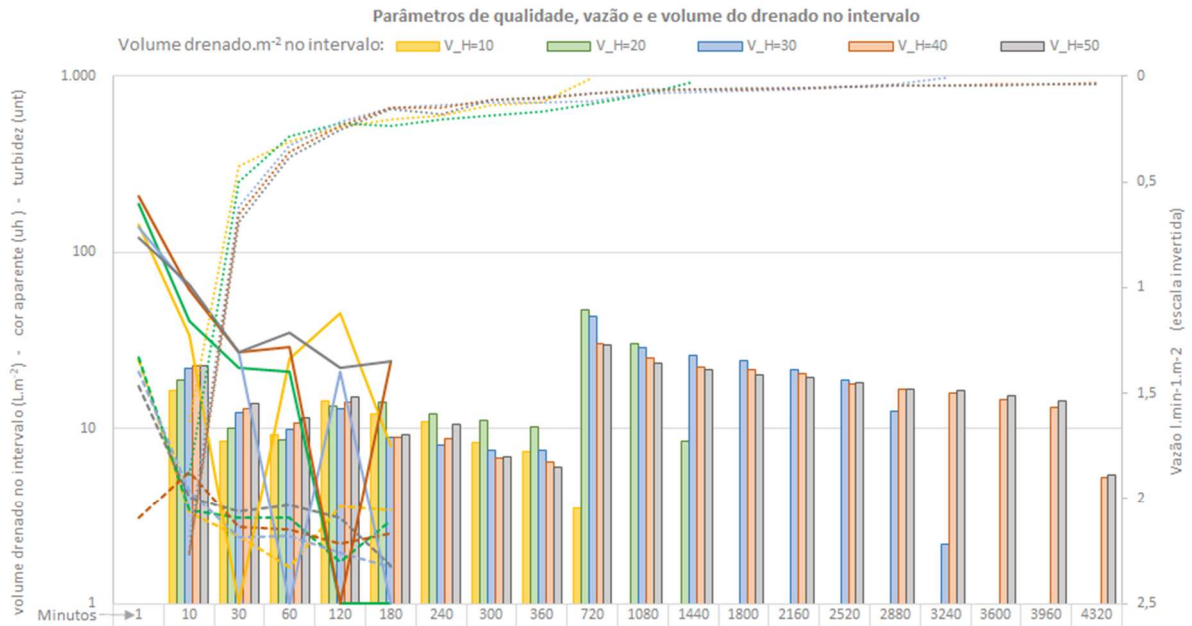
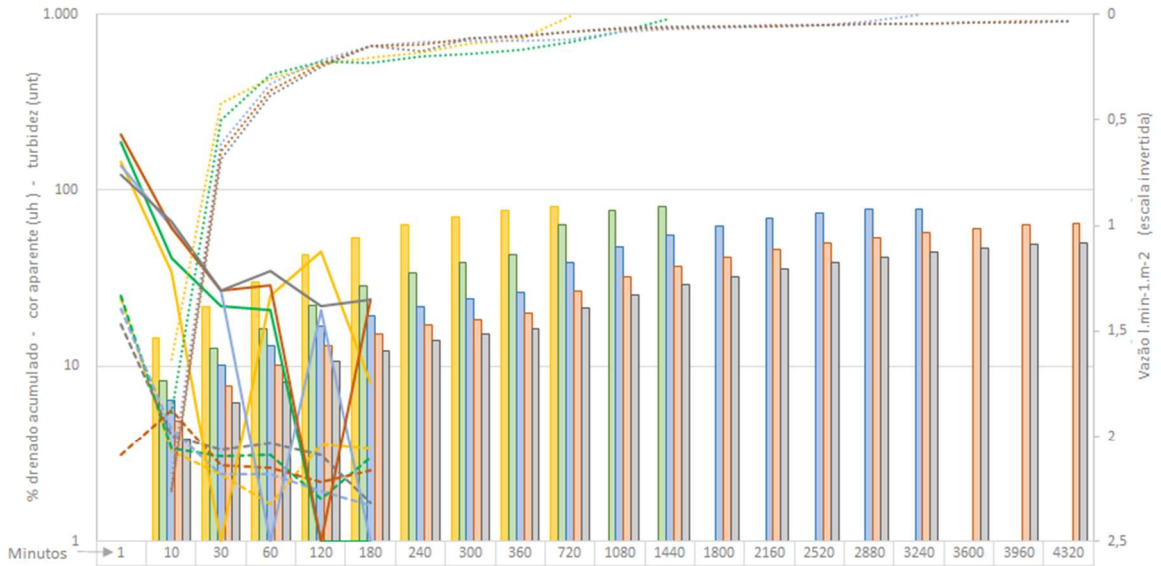


Ensaio 61

Ensaio %ST=2,5 - geotêxtil 600g.m⁻² NT

Lodo 2ª Campanha de coleta

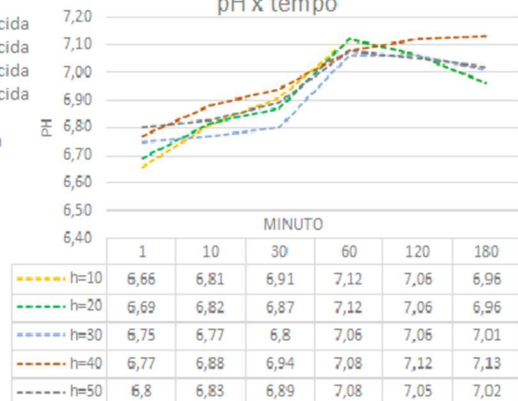
TAS Kg.m⁻²: 2,5 5,0 7,5 10,0 12,5
 Turbidez UNT: Tu_H=10 Tu_H=20 Tu_H=30 Tu_H=40 Tu_H=50
 Cor aparente UH: Co_H=10 Co_H=20 Co_H=30 Co_H=40 Co_H=50
 Vazão L.min⁻¹.m⁻²: Q_H=10 Q_H=20 Q_H=30 Q_H=40 Q_H=50
 Parâmetros de qualidade, vazão e porcentagem de água livre drenada
 % Lodo drenado acumulado: %DR_H=10 %DR_H=20 %DR_H=30 %DR_H=40 %DR_H=50



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
- ST = % de sólidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

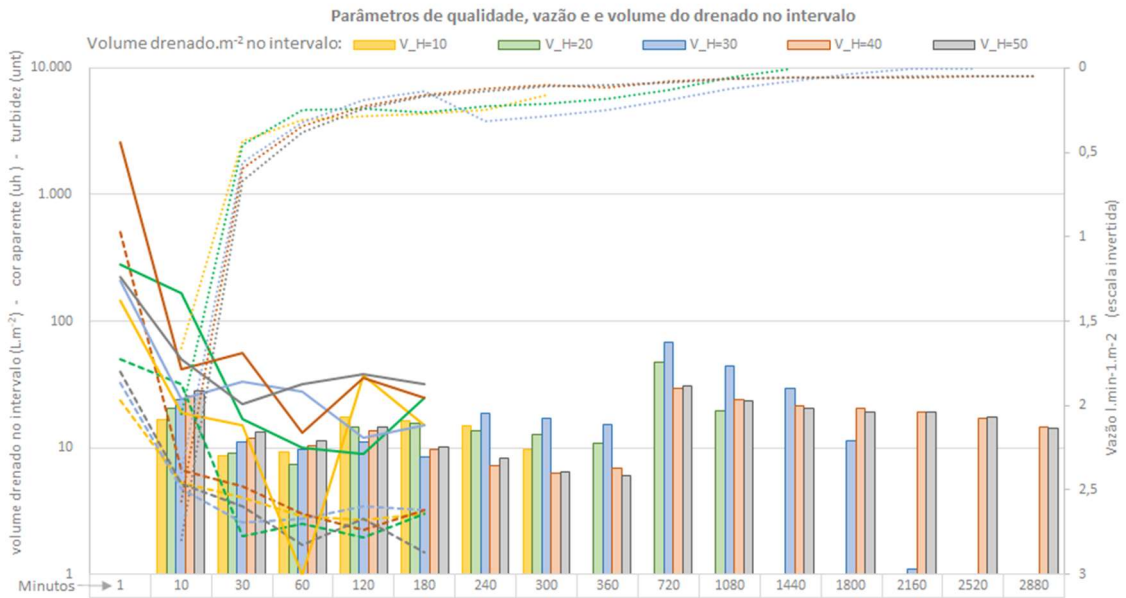
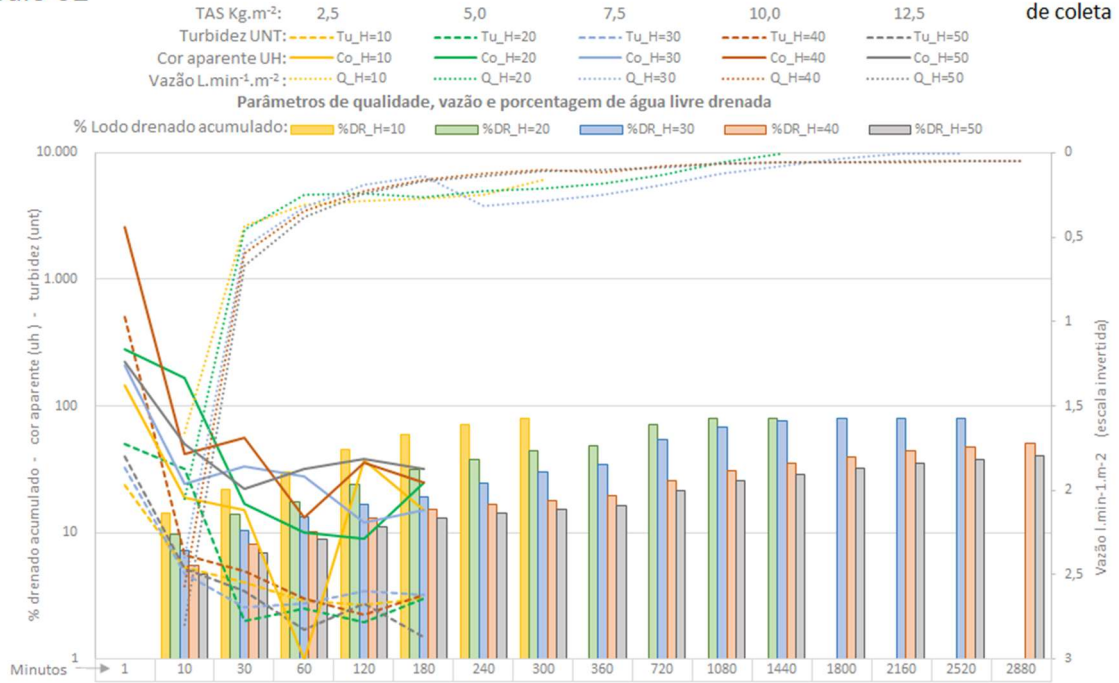
pH x tempo



Ensaio 62

Ensaio %ST=2,5 - geotêxtil 500g.m⁻² NT

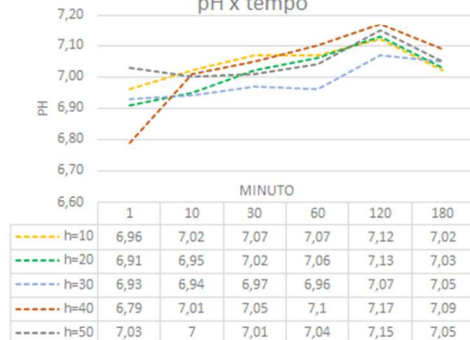
Lodo 2ª Campanha de coleta



Legenda Siglas:

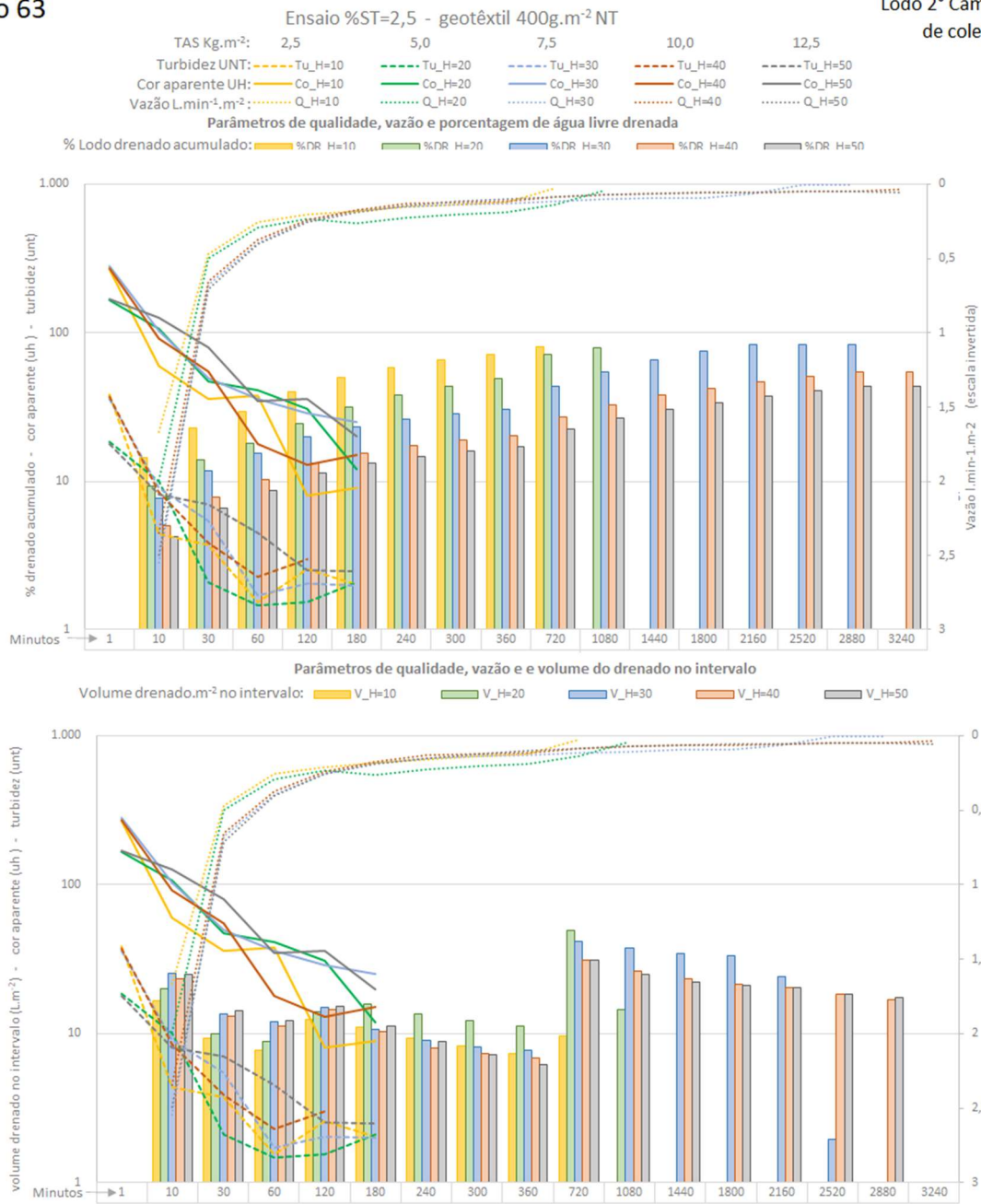
- %DR = % Lodo drenado acumulado
- Tu = Turbidez (UNT)
- Co = Cor aparente (UH)
- Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
- V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
- H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
- Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
- ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
- 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
- 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
- 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
- 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
- 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

pH x tempo

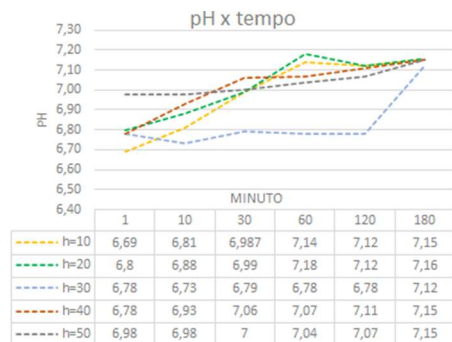


Ensaio 63

Lodo 2° Campanha de coleta



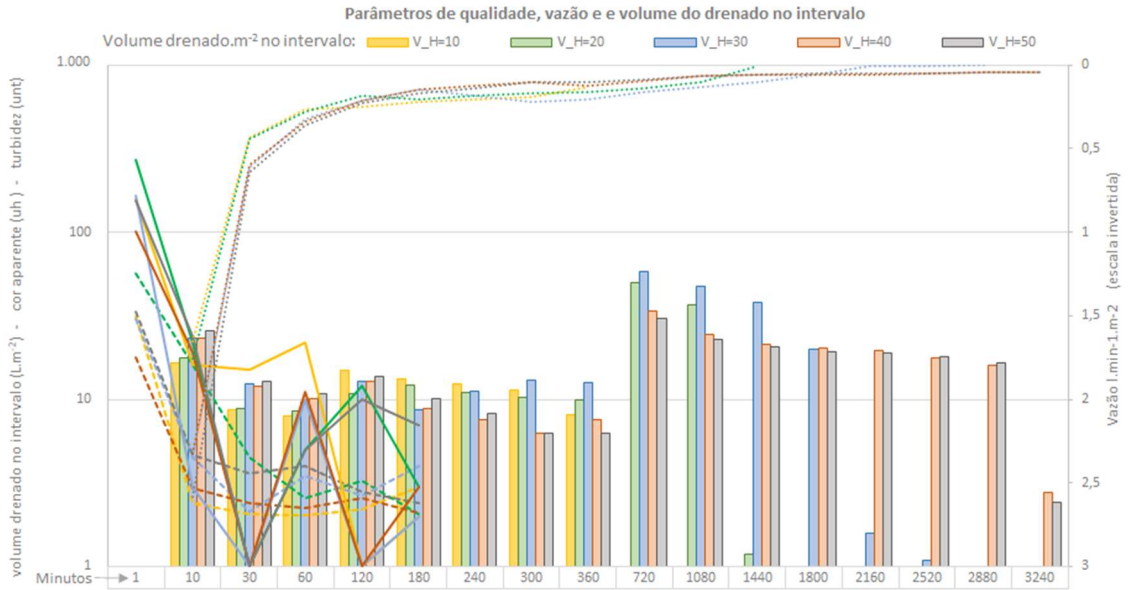
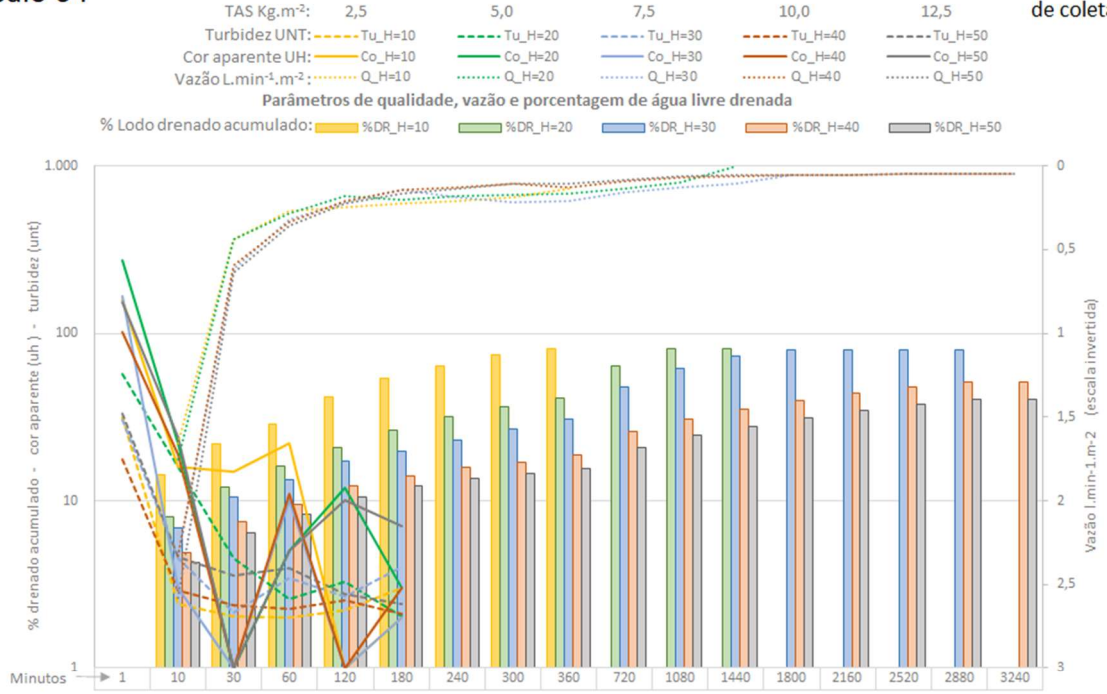
- Legenda Siglas:**
- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - Tu = Turbidez (UNT)
 - Co = Cor aparente (UH)
 - Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 - ST = % de sólidos totais inicial
 - 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



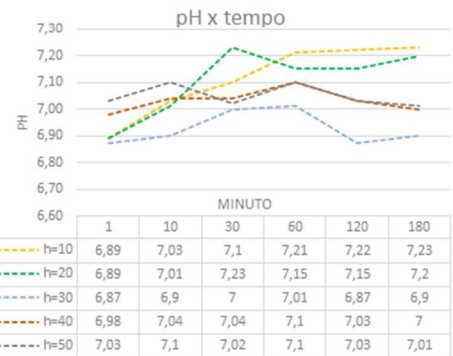
Ensaio 64

Ensaio %ST=2,5 - geotêxtil 300g.m⁻² NT

Lodo 2° Campanha de coleta



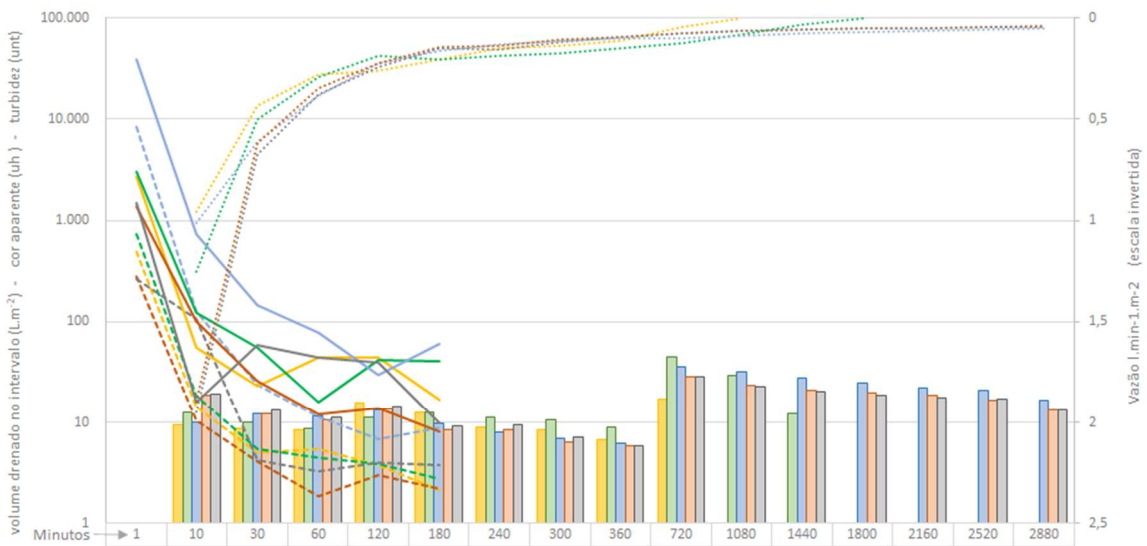
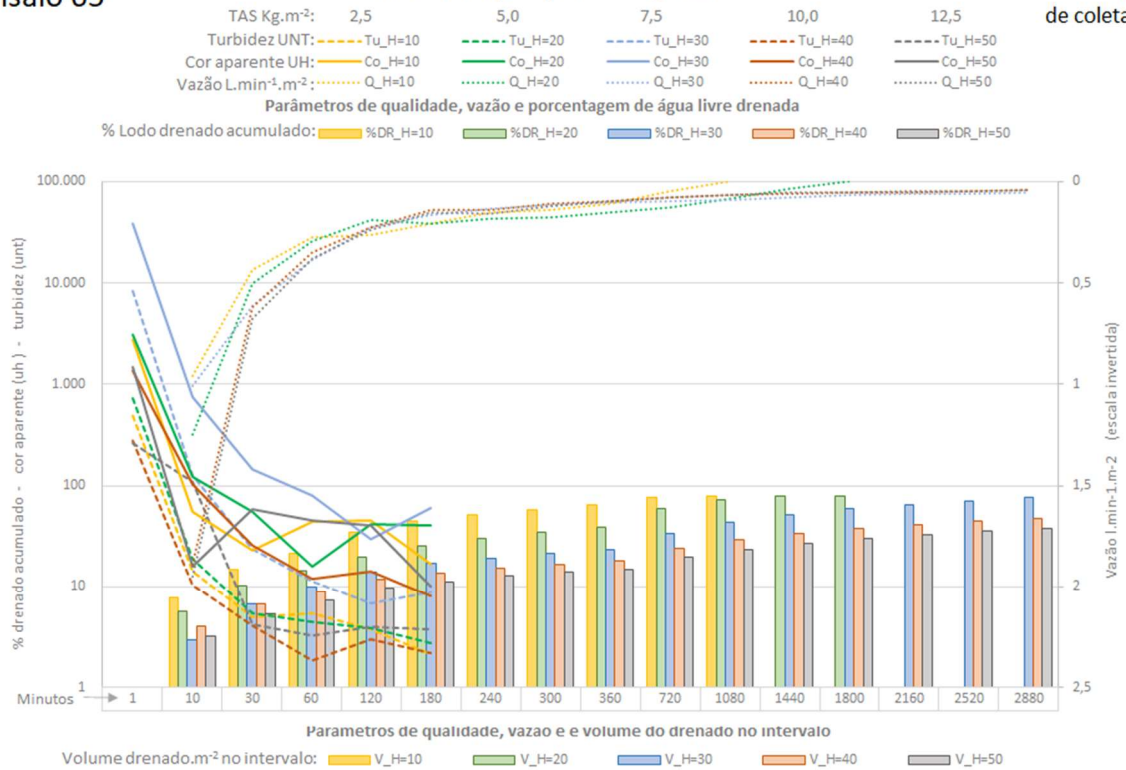
- Legenda Siglas:**
- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - Tu = Turbidez (UNT)
 - Co = Cor aparente (UH)
 - Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - Ta = Taxa e aplicação de sólidos (kg.m⁻²)
 - ST = % de sólidos totais inicial
 - 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



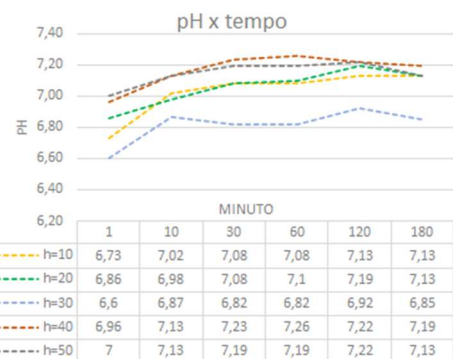
Ensaio 65

Ensaio %ST=2,5 - geotêxtil 55/55 UV

Lodo 2° Campanha de coleta



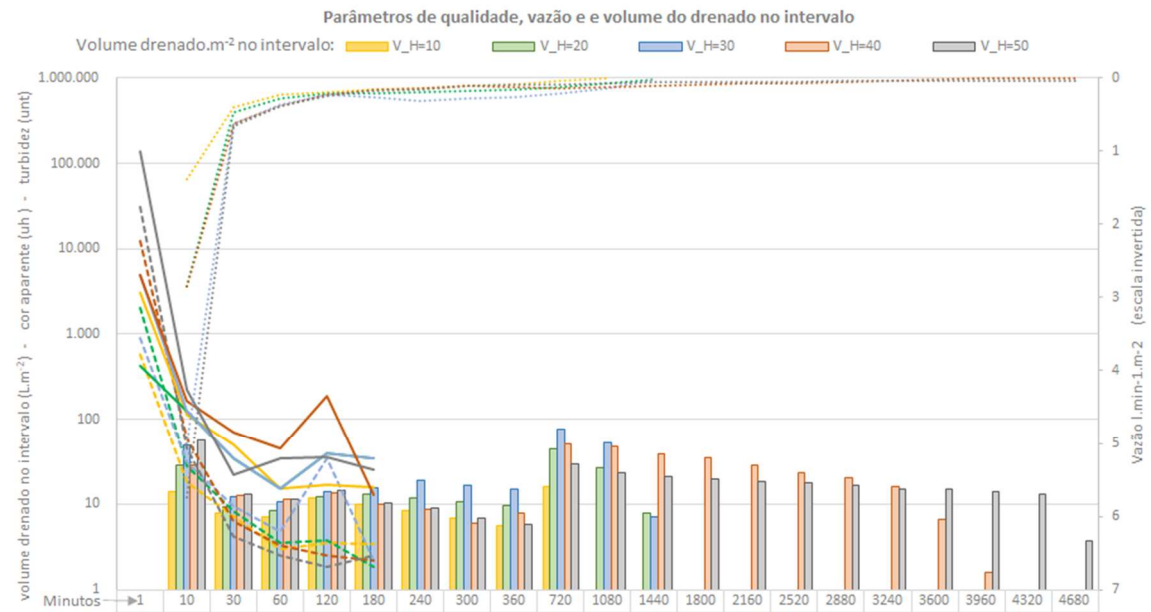
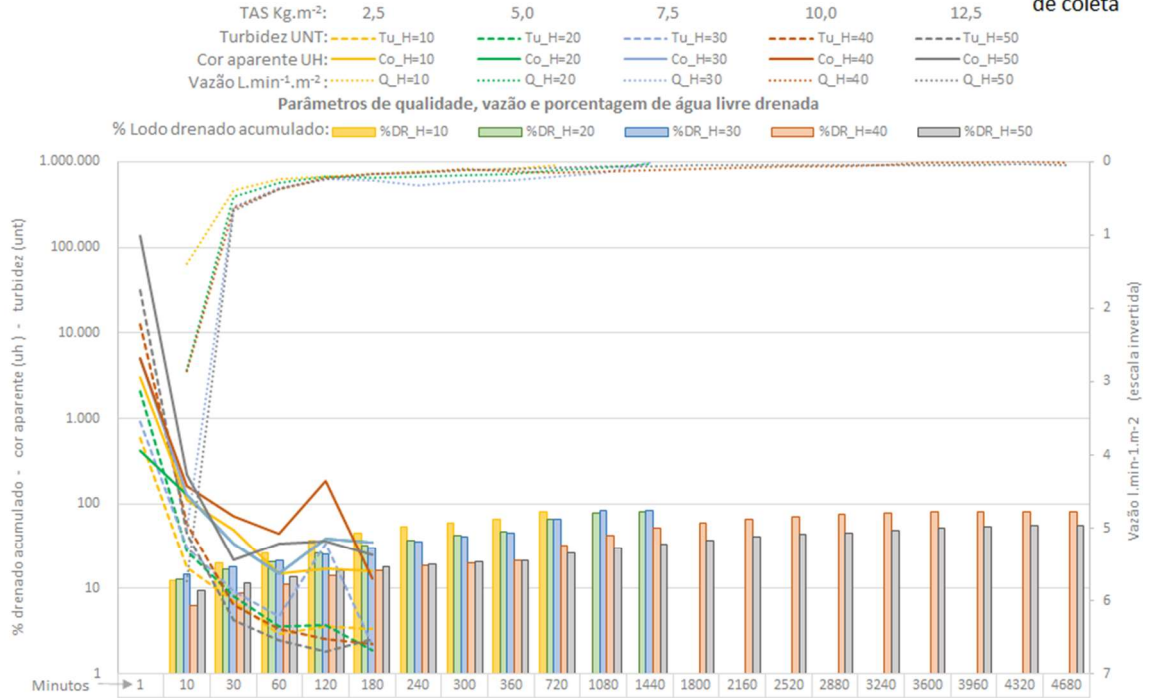
Legenda Siglas:
 %DR = % Lodo drenado acumulado
 Tu = Turbidez (UNT)
 Co = Cor aparente (UH)
 Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 V = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
 ST = % de solidos totais inicial
 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida



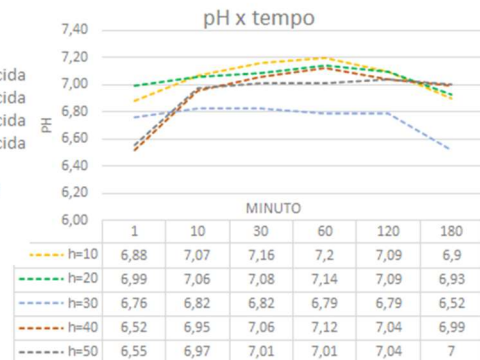
Ensaio 66

Ensaio %ST=2,5 - geotêxtil 105/105 DW

Lodo 2ª Campanha de coleta



- Legenda Siglas:
- DR = % Lodo drenado acumulado
 - J = Turbidez (UNT)
 - o = Cor aparente (UH)
 - ∩ = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - = Voume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - ∩ = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
 - Γ = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

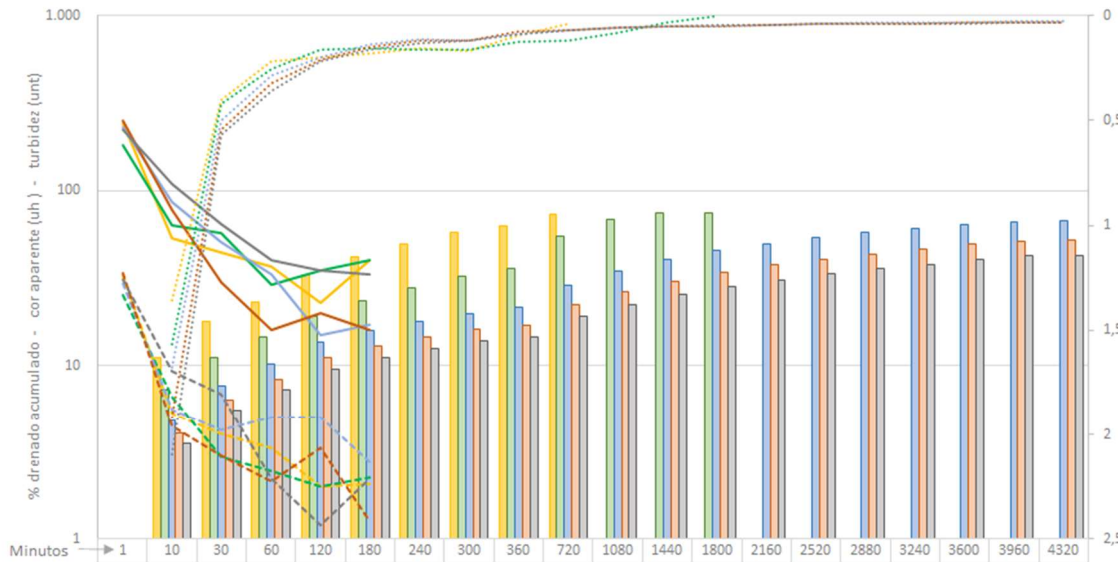


Ensaio 67

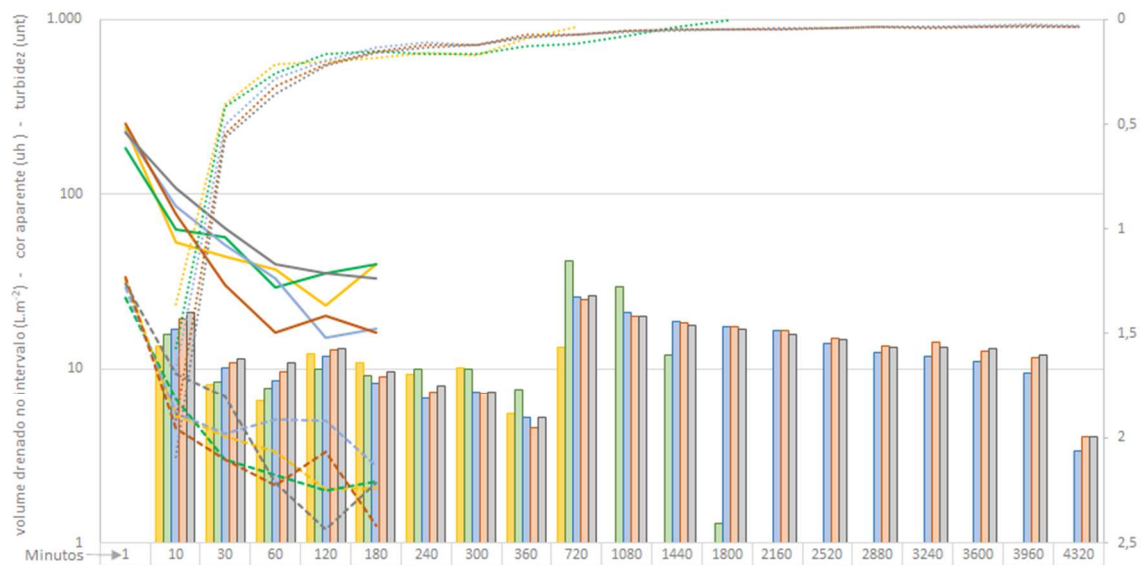
Ensaio %ST=3,0 - geotêxtil 400g.m⁻² NT*

Lodo 2° Campanha de coleta

TAS Kg.m⁻²: 3,0 6,0 9,0 12,0 15,0
 Turbidez UNT: Tu_H=10 Tu_H=20 Tu_H=30 Tu_H=40 Tu_H=50
 Cor aparente UH: Co_H=10 Co_H=20 Co_H=30 Co_H=40 Co_H=50
 Vazão L.min⁻¹.m⁻²: Q_H=10 Q_H=20 Q_H=30 Q_H=40 Q_H=50
Parâmetros de qualidade, vazão e porcentagem de água livre drenada
 % Lodo drenado acumulado: %DR_H=10 %DR_H=20 %DR_H=30 %DR_H=40 %DR_H=50



Parâmetros de qualidade, vazão e e volume do drenado no intervalo
 Volume drenado.m² no intervalo: V_H=10 V_H=20 V_H=30 V_H=40 V_H=50



Legenda Siglas:

- %DR = % Lodo drenado acumulado
 - Tu = Turbidez (UNT)
 - Co = Cor aparente (UH)
 - Q = Vazão (L.min⁻¹.m⁻²)
 - V = Volume drenado no intervalo (L.m⁻²)
 - H (x) = Altura da camada de lodo inicial (cm)
 - Ta = Taxa e aplicação de solidos (kg.m⁻²)
 - ST = % de solidos totais inicial
- 600 = Geotêxtil de 600g.m⁻² não tecida
 - 500 = Geotêxtil de 500g.m⁻² não tecida
 - 400 = Geotêxtil de 400g.m⁻² não tecida
 - 300 = Geotêxtil de 300g.m⁻² não tecida
 - 55 = Geotêxtil 55/55 UV tecida
 - 105 = Geotêxtil 105/105 DW tecida

pH x tempo

