

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

SAMIRA TESSAROLLI DE SOUZA

**Desempenho de tubos geotêxteis não tecidos aplicados em estação de  
tratamento de água**

Versão Corrigida

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

São Carlos

2021

SAMIRA TESSAROLLI DE SOUZA

**Desempenho de tubos geotêxteis não tecidos aplicados em estação de  
tratamento de água**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Geotecnia.

Orientador: Prof. Assoc. Jefferson Lins da Silva

São Carlos

2021

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **SAMIRA TESSAROLLI DE SOUZA**.

Título da dissertação: "Desempenho de tubos geotêxteis não tecidos aplicados em estação de tratamento de água".

Data da defesa: 24/01/2022.

### **Comissão Julgadora**

### **Resultado**

Prof. Associado **Jefferson Lins da Silva**  
**(Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADO

Profa. Dra. **Maria das Graças Gardoni Almeida**  
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

APROVADO

Profa. Dra. **Delma de Mattos Vidal**  
(Instituto Tecnológico de Aeronáutica/ITA)

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:  
Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, agradeço por abençoar e conduzir meu caminho.

À minha família, pelo amor incondicional, por estarem ao meu lado, prontos para me ajudar em qualquer situação.

Um agradecimento especial ao meu pai, por sua dedicação e disposição em me ajudar. Obrigada por fabricar as estruturas metálicas utilizadas em campo e por realizar toda montagem da infraestrutura, colocando em prática minhas ideias, patrocinando e sendo meu porto seguro. Sem você nada seria possível.

Ao Eng. Silvio Palma pelo apoio e incentivo.

Ao Professor Jefferson Lins da Silva, pela sua dedicação e orientação, por todas as oportunidades que fez tornar realidade.

Ao Clever, pela prontidão em ajudar e a todo o pessoal do Laboratório de Geossintéticos da EESC-USP, todo o tempo atenciosos comigo.

Às professoras Maria das Graças Gardoni e Delma Vidal, por suas valiosas contribuições para o crescimento da pesquisa.

À colega de pesquisa, Maria Alejandra, por sua colaboração e ajuda.

À Yara, que me ajudou a encontrar ânimo quando este me faltou.

À Ober, por todo apoio e patrocínio, materializados principalmente nos tubos geotêxteis não tecidos e em toda instrumentação.

À CODEN, por permitir a realização da pesquisa em suas instalações e por todo apoio prestado diariamente por seus funcionários, especial ao Evaldo e ao Lucas.

À Cipatex, pela doação de geomembrana de PVC.

À Maccaferri, pela doação do geocomposto drenante.

Ao Cauê, por sua dedicação em montar com perfeição toda instrumentação utilizada.

## RESUMO

SOUZA, Samira Tessarolli de. Desempenho de tubos geotêxteis não tecidos aplicados em estação de tratamento de água. 2021. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Dentre as técnicas de desaguamento disponíveis no mercado, a utilização de tubos geotêxteis tem ganhado espaço devido as vantagens que apresenta em relação as soluções convencionais naturais e mecanizadas. Este sistema é normalmente fabricado a partir de geotêxteis tecidos ou compostos, devido a propriedade de alta resistência. O uso apenas do geotêxtil não tecido é pouco explorado, apesar de apresentar boas propriedades hidráulicas e bom custo-benefício. Este trabalho avaliou o desempenho geométrico, hidráulico e mecânico de dois tubos geotêxteis não tecidos em escala real usados para desaguamento de lodo de uma Estação de Tratamento de Água (ETA). Os tubos foram preenchidos com lodo do decantador da ETA com e sem adição de polímero floculante. Cinco tecnologias de monitoramento foram utilizadas para aquisição dos dados: medidor de vazão, encoder de deslocamento linear por cabo, sensor de ultrassom, rastreamento de laser em perspectiva e Light Detection and Ranging (LIDAR). Foram obtidos os parâmetros geométricos da seção transversal durante os enchimentos e deságues sequenciais, as vazões de entrada no tubo geotêxtil, as características do lodo de entrada e do percolado de saída, as deformações resultantes nos geotêxteis e propriedades do geotêxtil degradado, após o fim dos ensaios. Estes dados foram combinados, de forma a apresentar o desempenho dos tubos e comparados com estimativas de métodos analíticos propostos na literatura, sendo três métodos com base na teoria da membrana, dentre eles um considerando as deformações do geotêxtil. As análises sugerem boa concordância entre os resultados analíticos e experimentais. Os resultados também foram comparados a ensaios de semi-desempenho, para avaliar a aplicabilidade dos ensaios de bancada, onde encontrou-se uma melhor correlação para os ensaios com adição de polímero floculante. A presença de polímero floculante também influenciou diretamente nas condições de desaguamento e na evolução do teor de sólidos na fase de consolidação. A menor resistência a tração oferecida por este tipo de geotêxtil em relação aos tecidos, não se apresentou como um fator limitante à sua utilização, indicando que seu uso deveria ser mais explorado para o desaguamento de lodos de ETA, sempre que uma análise criteriosa conclua que seu uso seja viável.

Palavras-chave: Geossintéticos. Tubos geotêxteis não tecidos. Ensaio em escala real.

## ABSTRACT

SOUZA, Samira Tessarolli de. Performance of nonwoven geotextile tubes in a water treatment plant. 2021. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Among the dewatering techniques available on the market, the use of geotextile tubes has gained ground due to its advantages over conventional natural and mechanized solutions. This system is usually manufactured from woven or composite geotextiles due to their high strength properties. The use of only nonwoven geotextiles is little explored, despite their excellent hydraulic properties and good cost-effectiveness. This work evaluated the geometric, hydraulic and mechanical performance of two full-scale nonwoven geotextile tubes used for dewatering sludge from a Water Treatment Plant (WTP). The tubes received a WTP decanter sludge with and without polymer addition. Five monitoring technologies made the data acquisition: flow meter, cable linear displacement encoder, ultrasound sensor, perspective laser tracking, and Light Detection and Ranging (LIDAR). The data collected were: the geometric parameters of the cross-section during sequential filling and dewatering, the inlet flow rates into the geotextile tube, the characteristics of the inlet sludge and outlet percolate, the resulting deformations in the geotextiles, and properties of the degraded geotextile after the tests over. All this information were combined to present the performance of the tubes and compared with estimates from analytical methods proposed in the literature three methods are based on the membrane theory, among them one considering the deformations of the geotextile. Analyzes suggest good agreement between analytical and experimental results. The results were also compared to semi-performance tests, to evaluate the applicability of the bench tests, where a better correlation was found for the tests with the addition of flocculant polymer. The presence of flocculant polymer also directly influenced the dewatering conditions and the evolution of the solids content in the consolidation phase. The lower tensile strength offered by this type of geotextile in relation to wovens, did not appear to be a limiting factor for its use, indicating that its use should be further explored for the dewatering of WTP sludge, whenever a careful analysis concludes that its use is feasible.

Keywords: Geosynthetics. Nonwoven geotextile tubes. Full-Scale Test.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de fabricação de um tubo geotêxtil.....	28
Figura 2 – Classificação geral das tecnologias de tratamento de água. ....	31
Figura 3 – Fases do tratamento de água em uma ETA de ciclo completo. ....	32
Figura 4 – Exemplo de tanque de equalização com bombas e misturadores. ....	35
Figura 5 – Exemplo de barrilete com chicana e inserção de polímero. ....	36
Figura 6 – Esquema da infraestrutura necessária para o desaguamento de lodo de ETA através de tubos geotêxteis.....	36
Figura 7 – a) Preenchimento do SCR no interior da caçamba b) Envio facilitado do material desaguado para o aterro através de engate na caçamba. ....	37
Figura 8 – Distribuição da água no floco de lodo. ....	39
Figura 9 – Com o acionamento da bomba, inicia-se o enchimento do tubo geotêxtil, que imediatamente após, começa a desaguar.....	40
Figura 10 – Ciclos de enchimento e deságue ao longo do tempo.....	41
Figura 11 – Curvas de evolução do teor de sólidos e redução do volume. ....	43
Figura 12 – Comparação da evolução do teor de sólidos com e sem o uso de polímero, sendo a) panorama genérico e b) evolução do teor de sólidos com o tempo em meses. ....	44
Figura 13 – Ensaio de desaguamento em cone: (a) preparação de polímero em agitador magnético de bancada, (b) adição de polímero no jarro de Jar Test e (c) ensaio Jar Test.....	46
Figura 14 – Emsaio de cone.....	47
Figura 15 – Emsaio com tubo geotêxtil em escala reduzida 1- lodo separado para ensaio; 2- estrutura do ensaio; 3- homogeneização do lodo; 4- lodo sendo vertido para interior da bolsa; 5- deságue; 6- lodo desaguado após o ensaio.....	48
Figura 16 – Zonas de filtração de material poroso e partículas em suspensão durante o processo de bombeamento/desaguamento. ....	49
Figura 17 – Distribuição da umidade e formação do “Filter Cake”. ....	53
Figura 18 – Esforços solicitantes em um tubo com fluido pressurizado.....	54
Figura 19 – Parâmetros geométricos utilizados na metodologia de Plaut e Suherman (1998).....	58
Figura 20 – Elemento infinitesimal, de S a S+dS. ....	58

Figura 21 – Etapas de cálculo do método de Plaut e Suherman (1998) .....	59
Figura 22 – Parâmetros utilizados na metodologia de Guo <i>et al.</i> (2014).....	60
Figura 23 – Diagrama de corpo livre para curva infinitesimal.....	61
Figura 24 – Etapas de cálculo da proposta de Cantre e Saathoff (2011) inseridas no método de Plaut e Suherman (1998). .....	63
Figura 25 – Curva tensão-deformação típica para geotêxteis com comportamento linear. A a E representam pontos específicos nesta curva.....	64
Figura 26 – Curva para razão de Poisson inicial ( $\nu$ ) igual a 0,5: os valores diminuem quando as deformações aumentam. ....	65
Figura 27 – Fluxograma da metodologia de pesquisa.....	66
Figura 28 – Variação da forma do tubo durante o enchimento. ....	67
Figura 29 – Esquema de aplicação de pressões. Estágio 1: início do bombeamento; Estágio 2: tubo na seção de referência; Estágio 3: tubo com pressão de bombeamento. ....	68
Figura 30 – Dimensões do modelo adotado com um quarto da geometria completa. ....	70
Figura 31 – Geometria dos elementos de malha.....	70
Figura 32 – Evolução da seção transversal com o aumento da pressão de bombeamento ( $p_0$ )......	71
Figura 33 – Comparação da tensão circunferencial (experimento de laboratório com método analítico).....	72
Figura 34 – Identificação dos pontos de referência no modelo numérico. ....	72
Figura 35 – Variação das tensões ao longo da metade da seção do tubo (seção transversal).....	73
Figura 36 – Dimensões o tubo geotêxtil em campo (amarelo), com altura 0,826m (em vermelho) e com 1,0m de altura (em verde). ....	74
Figura 37 – Tensões na seção transversal obtida por modelagem numérica para a retroanálise do estudo de campo de Silva (2017). ....	75
Figura 38 – Vista aérea ETA Bela Vista com numeração dos decantadores. Em amarelo, área de disposição dos tubos geotêxteis.....	80
Figura 39 – a) Disposição dos bags verticais e abertos, sendo utilizados para desaguamento do lodo na ETA. Fonte: Pessoa (2007) e b) Leitões de secagem final. ....	80

Figura 40 – Estrutura metálica com piso em concreto a direita e pátio com piso intertravado a esquerda. ....	81
Figura 41 – Granulometria dos sólidos presentes no lodo da ETA Jardim Bela Vista. ....	82
Figura 42 – Curva do volume desaguado para os ensaios 1A, 1B e 1C. ....	85
Figura 43 – Dimensões do tubo vazio medidas em campo. ....	89
Figura 44 – Bocal de enchimento com flange metálica. ....	89
Figura 45 – Linha do tempo dos ensaios de campo. ....	91
Figura 46 – Esquema das instalações da ETA e adaptações feitas para permitir o bombeamento ....	91
Figura 47 – Esquema da intervenção na tubulação de recalque para o tubo geotêxtil preenchido com lodo com adição de polímero. ....	92
Figura 48 – Estrutura para monitoramento do tubo geotêxtil preenchido com lodo sem polímero. ....	93
Figura 49 – Infraestrutura para monitoramento do tubo geotêxtil preenchido com lodo com polímero (apesar de não ser possível visualizar na imagem, o GCD encontra-se instalado abaixo no tubo geotêxtil). ....	93
Figura 50 – Bomba submersível modelo EG-1000. ....	94
Figura 51 – Curva de recalque da bomba. ....	95
Figura 52 – Bomba peristáltica. ....	96
Figura 53 – Medidor de vazão a) Conversor MV110 b) Sensor MS2500. ....	97
Figura 54 – Funcionamento dos encoders. ....	99
Figura 55 – Instalação dos encoders. ....	99
Figura 56 – Posicionamento dos encoders no tubo geotêxtil. ....	100
Figura 57 – Sensor ultrassom. ....	101
Figura 58 – Processamento de imagem para transformação da linha a laser em formato DWG. ....	102
Figura 59 – LIDAR. a) Equipamento b) Instalação c) Carcaça. ....	103
Figura 60 – Tubos de PVC para referência nas leituras. ....	103
Figura 61 – Leituras do LIDAR captando as referências em tubo de PVC. ....	104
Figura 62 – Esquema de enchimento, informações obtidas previamente e itens de monitoramento – SCR-S. ....	107
Figura 63 – Esquema de enchimento, informações obtidas previamente e itens de monitoramento – SCR-C. ....	110

Figura 64 – Janelas abertas para coleta de amostras.....	113
Figura 65 – Materiais utilizados para coleta de amostras. ....	113
Figura 66 – Localização dos quadrantes e regiões para coleta de amostras.....	113
Figura 67 – Localização dos pontos de coleta de amostras.....	114
Figura 68 – Pontos de referência para dados do LIDAR.....	115
Figura 69 – Eixos de espelhamento de um quarto da seção monitorada para obtenção da seção transversal.....	116
Figura 70 – Limitação imposta ao espelhamento pela base. ....	116
Figura 71 – Seção transversal: distância dos pontos de maior largura da seção aos eixos “Y” .....	117
Figura 72 – Obtenção da seção axial.....	117
Figura 73 – Modelo 3D - etapas de obtenção do volume.....	118
Figura 74 – Curva média tensão-deformação para amostra virgem na direção transversal com módulo de elasticidade. A área sombreada representa os valores máximos e mínimos entre os cinco espécimes.....	121
Figura 75 – Etapas de cálculo inseridas no código de programação do método de Cantré e Saathoff (2011) para obtenção das deformações e da nova circunferência no estado plano de deformações Li.....	123
Figura 76 – Monitoramento da seção transversal SCR-S3. ....	127
Figura 77 – Monitoramento da seção transversal SCR-S4. ....	127
Figura 78 – Monitoramento da seção transversal SCR-C2. Altura máxima atingida 62,1 cm. ....	128
Figura 79 – Monitoramento da seção transversal SCR-C3. Altura máxima atingida 131,2 cm. ....	128
Figura 80 – Monitoramento da seção transversal SCR-C4. Altura máxima atingida 130,9 cm. ....	128
Figura 81 – Monitoramento da seção transversal SCR-C5. Altura máxima atingida 134,9cm. ....	129
Figura 82 – Altura do ponto de costura em relação à altura de enchimento para os SCR-C2 a SCR-C5.....	130
Figura 83 – Evolução do formato ao longo do enchimento. ....	132
Figura 84 – Volume de armazenamento em relação à altura de enchimento para SCR-S3 e SCR-S4.....	133

Figura 85 – Volume de armazenamento em relação à altura de enchimento para SCR-C2 e SCR-C5.....	134
Figura 86 – Diferença volumétrica entre cálculo pelo método da seção estendida e pela modelagem 3D. ....	134
Figura 87 – Lavagem do decantador 1, das 4:00 às 10:06, sendo 4:00 às 07:20 a liberação do clarificado sobrenadante e das 07:20 às 10:06 a descarga do lodo do decantador.....	135
Figura 88 – Lavagem do decantador 2, das 6:00 às 11:35, sendo 06:00 às 06:30 a liberação do clarificado sobrenadante e das 06:30 às 11:35 a descarga do lodo do decantador.....	136
Figura 89 – Verificação da flocculação do lodo de entrada: a esquerda, duas amostras flocculadas e a direita, um exemplo de amostra não flocculada. ....	137
Figura 90 – Enchimento SCR-S1 com dados iniciais – 15/05/2019. ....	140
Figura 91 – Enchimento SCR-S1 sem dados iniciais – 15/05/2019. ....	140
Figura 92 – Enchimento SCR-S2 - 22/05/2019. ....	141
Figura 93 – Enchimento SCR-S3 - 29/05/2019. ....	141
Figura 94 – Enchimento SCR-S4 - 05/06/2019. ....	142
Figura 95 – Ciclos de enchimento e drenagem do SCR-S em função da altura. ....	144
Figura 96 – Balanço hidráulico SCR-S: volume bombeado total de 158 m <sup>3</sup> , volume interno 15 m <sup>3</sup> e volume percolado total 143 m <sup>3</sup> . ....	144
Figura 97 – Vazão do percolado durante os ciclos de enchimento e drenagem para SCR-S. ....	145
Figura 98 – Enchimento SCR-C1 – 09/10/2019. ....	146
Figura 99 – Enchimento SCR-C2 – 16/10/2019. ....	147
Figura 100 - Enchimento SCR-C3 – 23/10/2019. ....	147
Figura 101 - Enchimento SCR-C4 – 30/10/2019. ....	148
Figura 102 – Enchimento SCR-C5 – 06/11/2019. ....	148
Figura 103 – Vazão do percolado durante os ciclos de enchimento e drenagem para SCR-C. ....	149
Figura 104 – Ciclos de enchimento e drenagem do SCR-C em função da altura. ...	150
Figura 105 – Balanço hidráulico SCR-C: volume bombeado total de 138,46 m <sup>3</sup> , volume interno 19,98 m <sup>3</sup> e volume percolado total 118,48 m <sup>3</sup> . ....	150
Figura 106 – Evolução do teor de sólidos na etapa de consolidação SCR-S. ....	151
Figura 107 – Evolução do teor de sólidos na etapa de consolidação SCR-C. ....	151

Figura 108 – SCR-S após o período de consolidação, aberto e pronto para ser removido. ....	152
Figura 109 – As bordas (em rosa) tendem a evoluir mais rapidamente que o centro (em azul) em teor de sólidos. ....	152
Figura 110 – Separação do lodo consolidado em camadas ao longo do perfil. ....	153
Figura 111 – Variação da turbidez para o SCR-C1. ....	154
Figura 112 – Variação da turbidez para o SCR-C2. ....	154
Figura 113 – Variação da turbidez para o SCR-C3. ....	154
Figura 114 – Variação da turbidez para o SCR-C4. ....	155
Figura 115 – Variação da turbidez para o SCR-C5. ....	155
Figura 116 – SCR-S1: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial. ....	156
Figura 117 – SCR-S2: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial. ....	157
Figura 118 – SCR-S3: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial. ....	157
Figura 119 – SCR-S4: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial. ....	157
Figura 120 – Valores mínimos e máximos para altura e deformação mobilizada no sentido circunferencial para o SCR-S, identificando a distensão e retração do geotêxtil. ....	159
Figura 121 – SCR-S1: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido longitudinal. ....	160
Figura 122 – SCR-S2: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido longitudinal. ....	161
Figura 123 – SCR-S3: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido longitudinal. ....	161
Figura 124 – SCR-S4: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido longitudinal. ....	161
Figura 125 – Deformações mobilizadas nos sentidos transversal e longitudinal ao longo de todos os enchimentos e durante o período inicial de consolidação do SCR-S. ....	162
Figura 126 – SCR-C1: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial. ....	164

Figura 127 – SCR-C2: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial. ....	164
Figura 128 – SCR-C3: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial. ....	164
Figura 129 – SCR-C4: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial. ....	165
Figura 130 – SCR-C5: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial. ....	165
Figura 131 – Deformações mobilizadas nos sentidos circunferencial e longitudinal ao longo de todos os enchimentos e durante o período inicial de consolidação do SCR-C. ....	167
Figura 132 – Dados dos enchimentos coletados com o LIDAR para SCR-C3 a SCR-C5 apresentados por trechos para as máximas alturas de enchimento. ....	171
Figura 133 – Trajetórias percorridas pelas referências de trechos durante o enchimento SCR-C3. ....	172
Figura 134 – Comparação dos dados coletados para o trecho 2-1 através dos equipamentos LIDAR e encoder. ....	173
Figura 135 – Comparativo da evolução do teor de sólidos com e sem o uso de polímero floculante. ....	179

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre as principais tecnologias de desaguamento mecânico. .....	22
Tabela 2 – Valores calculados para peso específico do material igual a $\gamma=20\text{kN/m}^3$ . .....	67
Tabela 3 – Resultados das retroanálises realizadas pelas codificações das metodologias analíticas de Plaut e Suherman (1998) e Guo <i>et al.</i> (2014) comparadas aos dados coletados em campo.....	69
Tabela 4 – Sólidos totais, fixos e voláteis da amostra única de lodo utilizada para caracterização inicial.....	82
Tabela 5 – Propriedades características do geotêxtil.....	83
Tabela 6 – Polímero de melhor desempenho no ensaio de cone. ....	84
Tabela 7 – Ensaio selecionados para ensaios de cone.....	85
Tabela 8 – Avaliação da eficácia do polímero em função da taxa de desague nos ensaios de cone.....	86
Tabela 9 – Ensaio selecionados para ensaios de bolsa fechada. ....	86
Tabela 10 – Volume efluente acumulado (%) para ensaio de bolsa fechada.....	87
Tabela 11 – Turbidez (UNT) ao longo do desaguamento para ensaio de bolsa fechada. ....	87
Tabela 12 – Permissividade inicial (R) e após ensaios de desaguamento nos cenários avaliados. ....	88
Tabela 13 – Declaração de desempenho do fabricante. ....	89
Tabela 14 – Informações técnicas – Modelo EG-1000.....	94
Tabela 15 – Tabela de recalque da bomba.....	95
Tabela 16 – Informações Técnicas. ....	96
Tabela 17 – Ciclos de enchimento do SCR-S. ....	105
Tabela 18 – Momento de instalação dos equipamentos ao longo do SCR-S. ....	108
Tabela 19 – Ciclos de enchimento do SCR-C.....	109
Tabela 20 – Momento de instalação dos equipamentos ao longo do ensaio. ....	110
Tabela 21 – Parâmetros geométricos teóricos encontrados para $H = 1,52\text{ m}$ para o SCR-S1.....	126
Tabela 22 – Parâmetros geométricos teóricos encontrados $H = 1,31\text{ m}$ para o SCR-C3. ....	126

Tabela 23 – Parâmetros geométricos para a seção transversal na altura máxima de cada enchimento obtidos pela tecnologia LIDAR para SCR-C. ....	129
Tabela 24 – Diferença percentual entre dados de campo e valores teóricos – SCR-C3. ....	131
Tabela 25 – Verificação do teor de sólidos e floculação do SCR-C1. ....	137
Tabela 26 – Verificação do teor de sólidos e floculação do SCR-C2. ....	138
Tabela 27 – Verificação do teor de sólidos e floculação do SCR-C3. ....	138
Tabela 28 – Verificação do teor de sólidos e floculação do SCR-C4. ....	138
Tabela 29 – Verificação do teor de sólidos e floculação do SCR-C5. ....	139
Tabela 30 – Resultados obtidos do código de programação para o método de Cantré e Saathoff. Parâmetros de entrada: $L_0 = 9,20$ m, $Y = 9,93$ kN/m <sup>3</sup> , $H = 1,52$ m, $v_1 = 0,5$ para SCR-S1. ....	159
Tabela 31 – Apresentação dos dados de tração longitudinal coletados em campo para o SCR-S e comparação com a tração circunferencial. ....	163
Tabela 32 – Resultados obtidos do código de programação para o método de Cantré e Saathoff. Parâmetros de entrada: $L_0 = 9,20$ m, $Y = 10,01$ kN/m <sup>3</sup> , $H = 1,32$ m, $v_1 = 0,5$ para SCR-C3. ....	166
Tabela 33 – Apresentação dos dados de tração longitudinal coletados em campo para o SCR-C e comparação com a tração circunferencial. ....	167
Tabela 34 – Deformação mobilizada para cada trecho em função da altura ao longo do enchimento SCR-C1. ....	168
Tabela 35 – Deformação mobilizada para cada trecho em função da altura ao longo do enchimento SCR-C2. ....	169
Tabela 36 – Deformação mobilizada para cada trecho em função da altura ao longo do enchimento SCR-C3. ....	169
Tabela 37 – Deformação mobilizada para cada trecho em função da altura ao longo do enchimento SCR-C4. ....	170
Tabela 38 – Deformação mobilizada para cada trecho em função da altura ao longo do enchimento SCR-C5. ....	170
Tabela 39 – Deformação do trecho 2-1 coletada pelo LIDAR e deformação total do perímetro (dado calculado). ....	172
Tabela 40 – Pressões atuantes no tubo geotêxtil pela metodologia de Plaut e Suherman (1998). ....	174

Tabela 41 – Resultados do ensaio de tração em amostras coletadas na data de retirada do SCR-S, todas do geotêxtil superior do tubo.....	175
Tabela 42 – Resultados do ensaio de tração em amostras coletadas na data de retirada do SCR-C. ....	176
Tabela 43 – Resultados do ensaio de permissividade em amostras exumadas dos SCR-S e SCR-C. ....	177
Tabela 44 – Vazão de pico em l/s por enchimento para SCR-S e SCR-C. ....	178
Tabela 45 – Taxa de deságue em l/s dos ensaios de semi-desempenho de Aparicio-Ardila (2020). ....	181

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CODEN	Companhia de Desenvolvimento de Nova Odessa
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LIDAR	Light Detection and Ranging
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PVC	Policloreto de Vinila
RLP	Rastreamento de Laser em Perspectiva
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SCR	Sistema de Confinamento de Resíduos
UTR	Unidade de Tratamento de Resíduos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>20</b>
1.1	OBJETIVOS .....	24
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>26</b>
2.1	ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAS).....	30
2.2	PROPRIEDADES DO LODO.....	38
2.3	DESAGUAMENTO .....	39
<b>2.3.1</b>	<b>Jar test</b> .....	<b>45</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Ensaio de cone</b> .....	<b>46</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Ensaio com tubo geotêxtil em escala reduzida ASTM D7880 (ASTM, 2011)</b> .....	<b>47</b>
2.4	LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM CORPOS HÍDRICOS .....	48
2.5	CONCEITOS HIDRÁULICOS APLICÁVEIS A TUBOS GEOTÊXTEIS.....	49
2.6	PROPRIEDADES RELEVANTES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS GEOTÊXTEIS .....	53
2.7	MÉTODOS PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE TUBOS GEOTÊXTEIS.....	55
<b>2.7.1</b>	<b>Plaut e Suherman (1998)</b> .....	<b>57</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Guo et al. (2014)</b> .....	<b>59</b>
<b>2.7.3</b>	<b>Cantré e Saathoff (2011)</b> .....	<b>62</b>
<b>2.7.4</b>	<b>Silva (2019)</b> .....	<b>65</b>
2.8	DEGRADAÇÃO DE GEOTÊXTEIS .....	75
<b>2.8.1</b>	<b>Métodos para avaliação da durabilidade</b> .....	<b>76</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>78</b>
3.1	O LOCAL - ETA JARDIM BELA VISTA (NOVA ODESSA-SP).....	78
3.2	RESULTADOS UTILIZADOS DA PESQUISA DE APARICIO-ARDILA (2020) .....	81
<b>3.2.1</b>	<b>Caracterização do lodo</b> .....	<b>81</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Caracterização do geotêxtil</b> .....	<b>83</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Polímero floculante</b> .....	<b>83</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Resultados do ensaio de cone</b> .....	<b>84</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Resultados do ensaio de bolsa fechada</b> .....	<b>86</b>

3.3	TUBO GEOTÊXTIL.....	88
3.4	CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS.....	90
3.5	INFRAESTRUTURA PARA INSTALAÇÃO DOS TUBOS GEOTÊXTEIS.....	92
3.6	EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS DE MONITORAMENTO .....	93
<b>3.6.1</b>	<b>Bomba submersível.....</b>	<b>93</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Bomba peristáltica.....</b>	<b>95</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Medidor de vazão.....</b>	<b>97</b>
<b>3.6.4</b>	<b>Encoder de deslocamento linear por cabo .....</b>	<b>98</b>
<b>3.6.5</b>	<b>Sensor de ultrassom .....</b>	<b>100</b>
<b>3.6.6</b>	<b>Rastreamento de laser em perspectiva - RLP.....</b>	<b>101</b>
<b>3.6.7</b>	<b>Light Detection and Ranging - LIDAR.....</b>	<b>102</b>
3.7	ENSAIO SCR-S.....	104
3.8	ENSAIO SCR-C.....	108
3.9	PROTOCOLO DE COLETA DE AMOSTRAS NA FASE DE CONSOLIDAÇÃO.....	112
3.10	PROTOCOLA DE COLETA DE AMOSTRAS DO GEOTÊXTIL DEGRADADO .....	113
3.11	METODOLOGIAS PARA TRATAMENTO DOS DADOS.....	114
<b>3.11.1</b>	<b>Pontos de referência para dados do LIDAR .....</b>	<b>114</b>
<b>3.11.2</b>	<b>Obtenção da seção transversal – LIDAR e RPL.....</b>	<b>115</b>
<b>3.11.3</b>	<b>Obtenção do modelo 3D .....</b>	<b>116</b>
3.12	PRESSÃO DE BOMBEAMENTO NA ENTRADA DO TUBO GEOTÊXTIL.	118
3.13	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PLAUT E SUHERMAN (1998) E GUO <i>ET</i> <i>AL.</i> (2014).....	120
3.14	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CANTRÉ E SAATHOFF (2011).....	120
<b>3.14.1</b>	<b>Módulo elástico.....</b>	<b>120</b>
<b>3.14.2</b>	<b>Razão de Poisson .....</b>	<b>121</b>
<b>3.14.3</b>	<b>Código de programação .....</b>	<b>122</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>124</b>
4.1	GEOMETRIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL .....	124
<b>4.1.1</b>	<b>Seções teóricas .....</b>	<b>124</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Seções obtidas em campo.....</b>	<b>126</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Comparação entre seções obtidas em campo e teóricas .....</b>	<b>130</b>
4.2	ANÁLISES VOLUMÉTRICAS.....	132

4.3	MONITORAMENTO HIDRÁULICO .....	135
4.3.1	Lodo de entrada.....	135
4.3.2	Ciclos de enchimento e deságue .....	139
4.3.3	Etapa de consolidação .....	150
4.3.4	Ensaio de turbidez do percolado .....	153
4.4	MONITORAMENTO MECÂNICO .....	155
4.4.1	Deformação mobilizada – SCR-S .....	155
4.4.2	Deformação mobilizada – SCR-C .....	163
4.4.3	Pressão de bombeamento .....	173
4.4.4	Degradação do geotêxtil .....	175
4.5	ANÁLISES COMPARATIVAS ENTRE SCR-S E SCR-C.....	177
4.6	COMPARAÇÃO COM ENSAIOS DE APARICIO-ARDILA (2020) .....	180
4.6.1	SCR-S .....	180
4.6.2	SCR-C .....	181
5	CONCLUSÕES .....	183
	REFERÊNCIAS.....	186
	APÊNDICE A – Procedimento de instalação da infraestrutura dos tubos geotêxteis.....	195
	APÊNDICE B – Imagens da intervenção na tubulação de sucção (segundo tubo geotêxtil).....	200

## 1 INTRODUÇÃO

Os serviços de saneamento, prestados pelos estados ou municípios e regulamentados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (BRASIL, 2020), compreendem o abastecimento de água, tratamento de esgoto, destinação das águas de chuva e do lixo urbano. Dentre às etapas relacionadas ao abastecimento, no processo de tratamento da água, a remoção de poluentes dissolvidos e coloidais gera lodo como subproduto, material classificado pela normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo sólido e cuja disposição deve ser gerenciada. Como exemplo, em um sistema de saneamento básico completo, estima-se que para cada 1 m<sup>3</sup> de água tratada sejam gerados 20 g de resíduos sólidos e mais 76 g/m<sup>3</sup> no tratamento dos efluentes; ou seja, um total de 96 g/m<sup>3</sup> no processo como um todo (MOGAMI, 2010).

Apesar da classificação como resíduo sólido, a composição do lodo gerado apresenta mais de 95% de água em peso (MORVAI, 2018), o que torna necessário seu desaguamento para posterior disposição. O processo de desaguamento pode ser natural ou mecanizado.

O princípio do processo natural refere-se à evaporação e a percolação, abrangendo tecnologias como leitos e lagoas de secagem e sistemas de confinamento de resíduos. Os elevados tempo de retenção e espaço necessários podem limitar a utilização dos processos naturais, entretanto são tecnologias economicamente viáveis (MORVAI, 2018). Nos processos de desaguamento mecânico, por sua vez, a separação de sólidos e líquidos se baseia na diferença de tamanho das partículas (filtro-prensa, filtros a vácuo, prensa desaguadora (“belt-press”), prensas parafuso (C-Press) e prensas rotativas (“Rotary Fan Press”) ou na diferença do peso específico (centrífuga) entre as fases sólida e líquida (MORVAI, 2018). A grande vantagem do desaguamento mecânico é a redução do espaço necessário e o aumento da eficiência. Por outro lado, estes equipamentos geralmente exigem investimento inicial considerável, acompanhado de constante manutenção e um elevado gasto energético.

Tomando como exemplo uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), que assim como as Estações de Tratamento de Água (ETAs), também gera lodo em seu processo produtivo, o volume desse subproduto é de apenas 1 a 2% do volume do esgoto tratado, porém o processamento do lodo representa aproximadamente 40%

dos custos de implantação; 20 a 60% de custos de operação e 90% dos problemas operacionais (KHIARI *et al.*, 2004), o que nos mostra quão crítica essa etapa do tratamento pode se apresentar financeiramente.

A Tabela 1 mostra um comparativo entre as principais tecnologias de desaguamento mecânico. Se compararmos os métodos de desaguamento natural de maneira generalizada com os itens da Tabela 1, temos como pontos de destaque baixos investimentos, acompanhados de simples instalação, baixa manutenção e baixo consumo energético, porém com grande necessidade de espaço.

Com base nos dados apresentados, as tecnologias de desaguamento natural se tornam a única alternativa para casos com restrição de investimento financeiro. Dentre estas tecnologias, os sistemas de confinamento de resíduos (SCRs) são relativamente recentes, tendo sido iniciado seu uso para acondicionamento e dessecação de lodos e lamas na década de 2000 (VERTEMATTI; CASTRO, 2015).

A operação dos SCRs consiste no bombeamento do resíduo através de tubulação inserida em seus bocais, ocorrendo a retenção das partículas sólidas em seu interior e a passagem da fração líquida, desaguando o material de origem e promovendo aumento do teor de sólidos. A remoção da fração líquida gera uma diminuição do volume, permitindo nova recarga e iniciando-se assim um novo ciclo de enchimento e deságue até que a capacidade máxima de armazenamento seja atingida (SOUZA; PALMA, 2018). Portanto, além da evaporação e percolação por força gravitacional, a pressão gerada pelo próprio bombeamento auxilia para acelerar o desaguamento.

Tabela 1 – Comparativo entre as principais tecnologias de desaguamento mecânico.

	<b>Centrifuga Decanter</b>	<b>Prensa Desaguadora</b>	<b>Filtro Prensa</b>	<b>Prensa Parafuso “C-Press”</b>
Investimento necessário (baixo à alto)	++	+	++++	+++
Instalação (simples à complexa)	+	++	++++	++
Equipamentos auxiliares necessários (pouco a muito)	+	++	++++	+
Secagem (teor de sólidos finais, de baixo a alto)	+++	+	++++	+++
Sistema contínuo	Sim	Sim	Não	Sim
Automação	Fácil	Médio	Difícil	Médio
Consumo de polímero	Médio/Alto	Médio	Médio	Médio/Alto
Custo de manutenção	Alto	Médio	Médio	Baixo
Facilidade de treinamento da equipe de operação e manutenção	Treinamento específico	Fácil	Fácil	Treinamento específico
Espaço necessário para instalação (pequeno à grande)	+	++	++++	+++
Consumo de energia (KW/tonelada de sólidos seco)	Alto (30 – 60)	Baixo (10 – 25)	Médio (20 – 40)	Muito baixo (< 10)

*Escala: + a ++++*

Fonte: Morvai (2018).

Quando os sólidos estão encapsulados em SCRs, são eliminados dois dos principais contratempos aos quais ficam sujeitos na utilização de leitos e lagoas: a possibilidade de transbordamento, principalmente em função do grande volume de resíduos depositado associado a chuvas intensas, com potenciais danos ambientais e sociais (CASTRO, 2005) e também quanto à vulnerabilidade em períodos chuvosos, que implicam em aumento no tempo de secagem do resíduo, fator que retarda ainda mais sua saída para o aterro.

No caso dos SCRs, há também um ganho em termos de espaço físico, pois apresentam grandes alturas úteis por metro quadrado de área para disposição, podendo também ser empilhados e mantidos no local de enchimento, desde que a infraestrutura tenha sido preparada para isto. Duarte (2016) cita alturas de até 2,70 m para um único tubo geotêxtil (uma das nomenclaturas de SCR).

A importância da filtração em geotêxtil pode ser identificada ao entender que a destinação de resíduos encontra dois obstáculos principais: o alto custo e a complexidade operacional (BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Kuroda *et al.*

(2014) ao estudarem os processos de drenagem e secagem do lodo de decantadores de ETAs empregando geotêxteis, destacaram como vantagens o que seria a solução destes dois pontos: baixos custos de implantação e manutenção, além da facilidade de operação em relação aos sistemas mecânicos.

Em estudo recente, Guimarães (2019) relata que nas últimas décadas intensificaram-se pesquisas no desenvolvimento de diferentes processos e técnicas para o tratamento dos resíduos de ETA, mas que há poucos estudos que abordam o tratamento do resíduo gerado utilizando a filtração em geotêxtil, foco do presente trabalho.

Após uma série de pesquisas, além de se confirmar a afirmação citada, notou-se que em sua grande maioria, as publicações atuais contemplam casos de obra e estudos voltados para tubos geotêxteis tecidos e/ou ensaios em escala reduzida. A seguir, um breve resumo dos estudos encontrados.

Avancini (2017) e Guimarães (2019) avaliaram o desaguamento de lodo de Estações de Tratamento de Água em ensaios de bancada e em bolsa de pequena dimensão (da ordem de 50 cm x 50 cm) fabricadas a partir de geotêxtil tecido, avaliando a adição de diferentes dosagens e polímeros floculantes.

Urashima *et al.* (2018a) realizaram ensaios semelhantes e Urashima *et al.* (2018b) acrescentaram às análises a durabilidade de SCRs de geotêxteis tecidos de polipropileno com dois níveis distintos de anti-UV.

Aparicio-Ardila *et al.* (2020) seguiram os mesmos procedimentos de Avancini (2017) e Guimarães (2019) para os ensaios, também com lodo de ETA, com o diferencial de realizar análises comparativas de desempenho entre geotêxteis não tecidos e tecidos, avaliando ambos.

Müller, Vidal e Guanaes (2018) realizaram ensaios com SCRs confeccionados com geotêxtil tecido, possuindo 2,5 m de comprimento e 2,5 m de perímetro com lodo de ETA, utilizando, portanto, uma escala intermediária.

Ensaio em grande escala foram encontrados na literatura aplicados a mineração de ouro. O trabalho de Silva (2017) realizou além de ensaios de bancada, a avaliação do enchimento e empilhamento de tubos geotêxteis tecidos com dimensões de 2,0 m x 6,0 m. Silva (2019) baseou-se nos dados coletados em campo por Silva (2017) para realização de modelagem numérica e análise por meio de métodos analíticos.

A realização de ensaios em verdadeira grandeza apresenta diferenças significativas quanto às solicitações impostas ao geotêxtil, motivo pelo qual as pesquisas citadas realizam suas análises principalmente sob o ponto de vista hidráulico. A verificação da validade dos métodos de dimensionamento existentes na literatura aplicados a tubos geotêxteis não tecidos exige, portanto, SCRs de grandes dimensões.

Outra questão, seria a possível discrepância na evolução do teor de sólidos entre ensaios de pequena e grande escala, o que pode acarretar graves erros operacionais. Silva (2017) comprovou em seus resultados que essa discrepância não ocorreu em seu estudo em mineração de ouro. Para outros tipos de resíduo, a evolução do teor de sólidos ainda necessita ser investigada.

Deste modo, com vistas a expandir o conhecimento do uso de SCRs para filtração de resíduos de ETA, o propósito deste trabalho visa preencher uma lacuna na verificação do comportamento em operação de um tubo fabricado a partir de geotêxtil não tecido para desaguamento de lodo em escala real, avaliando o desempenho mecânico, hidráulico e o formato desenvolvido pelos tubos ao longo dos ciclos de enchimento e deságue e na etapa de consolidação.

Os dados obtidos com o presente estudo foram analisados e comparados com previsões de métodos analíticos propostos na literatura para determinação da geometria da seção e tensões mobilizadas no geotêxtil, a dados de pesquisas recentes em outra aplicação: tubos geotêxteis tecidos em mineração e aos ensaios de escala reduzida de Aparicio-Ardila (2020).

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho de um sistema de confinamento de resíduos permeável, produzido a partir de geotêxtil não tecido, no formato de tubo de grandes dimensões para ser utilizado em Estação de Tratamento de Água.

Os objetivos específicos deste trabalho são descritos a seguir:

- a) monitorar deformações no tubo geotêxtil ao longo dos ciclos de enchimento e drenagem com o intuito de entender seu comportamento;
- b) monitorar o formato da seção transversal ao longo dos ciclos de enchimento e drenagem, com o intuito de entender seu comportamento e

permitir análises sobre a capacidade volumétrica do tubo em função da altura de enchimento;

- c) monitorar a vazão de enchimento e o volume retido no interior dos tubos, a fim de quantificar o desaguamento ao longo do tempo e o efeito do uso de polímero floculante;
- d) monitorar a evolução do teor de sólidos ao longo do tempo com o objetivo de estabelecer o tempo de secagem necessário para envio ao aterro e comparar as coletas dos dois experimentos, com e sem uso de polímero floculante;
- e) coletar amostras do geotêxtil antes do envio para aterro, com intuito de comparar as propriedades permeabilidade e tração em relação a uma amostra intacta, discutindo sobre a degradação de uso;
- f) realizar análises sobre o formato da seção transversal, tração mobilizada no geotêxtil e pressão de enchimento, comparando dados de campo com resultados obtidos através dos métodos analíticos de Plaut e Suherman (1998), Guo *et al.* (2014) e Cantré e Saathoff (2011) e com ensaios de campo de Silva (2017) retro analisados por Silva (2019) através de modelagem numérica;
- g) realizar análises comparativas entre o ensaio em escala real deste trabalho com ensaios de semi-desempenho realizados Aparicio-Ardila (2020);
- h) avaliar o desempenho dos tubos geotêxteis não tecidos como solução para o tratamento de resíduos de ETAs.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura geral do texto é composta por este capítulo introdutório e outros quatro, sendo que no Capítulo 2 será apresentada a revisão da literatura que fundamentou o desenvolvimento da pesquisa e no Capítulo 3 serão apresentados os materiais, as tecnologias de instrumentação e os procedimentos utilizados para obtenção dos dados. Já no Capítulo 4 será feita a apresentação dos resultados e análises. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão conceituados os sistemas de confinamento de resíduos, discutindo nomenclaturas, materiais de fabricação e panoramas de aplicação, sendo de especial interesse as Estações de Tratamento de Água. Em seguida, serão apresentadas as propriedades do lodo gerado em ETAs e discutido sobre seu desaguamento e métodos para acelerá-lo. Serão abordados aspectos fundamentais para análise do desempenho hidráulico e mecânico de tubos geotêxteis. Também serão discutidos métodos analíticos e de modelagem numérica para análise, previsão e discussão dos resultados obtidos com monitoramento em campo de tubos geotêxteis em relação a forma da seção transversal e solicitações no geotêxtil.

Os sistemas de confinamento de resíduos são internacionalmente aplicados desde o final da década de 1970 e tiveram seu uso intensificado no início da década de 1980 como estruturas de gravidade, preenchidas hidráulicamente e utilizados como diques de contenção, espigões, quebra-ondas, entre outros (SILVA, 2017). Segundo Vertematti e Castro (2015), duas novas utilizações têm sido desenvolvidas intensamente desde o ano 2000: o acondicionamento de lodos e lamas, contaminados ou não, obtidos por dragagem em obras de desassoreamento de corpos hídricos e para dessecar lodos e lamas provenientes de Estações de Tratamento de Água, Esgoto e de Efluentes Industriais.

Com o passar dos anos, os SCRs se tornaram uma solução convencionalmente utilizada por ETAs e ETEs, sendo que em 2015, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) divulgou a Norma Técnica NTS 301 especificamente para estabelecer critérios de fabricação, qualificação, inspeção e instalação de “sacos geotêxteis” (SABESP, 2015). É de especial destaque que nessa norma os pré-requisitos do material de fabricação são direcionados para geotêxtil tecido, mostrando que a utilização de tubos geotêxteis não tecidos ainda é pouco difundida.

Apenas no parágrafo anterior foram utilizadas duas maneiras diferentes para se referir aos SCRs: “sacos geotêxteis” e “tubos geotêxteis não tecidos”, indicando que este geossintético possui diferentes nomenclaturas.

SCR é um termo definido pela recomendação 004 da IGS Brasil (IGS BRASIL, 2016) para um sistema contínuo (em forma de bolsa ou tubular) que contém resíduo em seu interior, sendo um termo genérico.

As diversas formas, volumes, processos de enchimento e materiais de fabricação implicam em diferentes nomenclaturas aos sistemas de confinamento, como tubos, bolsas, geoformas e geocontainers (LAWSON, 2008).

Segundo Lawson (2008), os tubos geotêxteis, por exemplo, são posicionados no local de enchimento e preenchidos até atingirem a forma geométrica requerida. O preenchimento é feito por bombeamento hidráulico. Suas dimensões encontram-se entre 1 e 10 m de diâmetro e até 200 m de comprimento. Essa definição é de particular interesse neste trabalho, pois será utilizada para nomear os SCRs aplicados em campo.

O processo de desaguamento inicia-se durante a disposição do resíduo com alto teor de umidade dentro do SCR. No decorrer do enchimento, a função de filtração e drenagem dos geotêxteis permite a passagem do fluido, enquanto as partículas sólidas são retidas no interior da bolsa (SILVA, 2019).

O desaguamento leva à redução de volume, facilitando o manuseio, transporte e disposição final dos sólidos ou mesmo sua reutilização (GUIMARÃES, 2019). Se optado por enviar os sólidos para aterro sanitário, por exemplo, menores volumes acarretam diminuição dos custos no traslado. No caso de se dispor os tubos de forma permanente, será necessária uma área menor para disposição.

Sua fabricação é realizada pela sobreposição e costura de dois ou mais geotêxteis. Colocam-se, posteriormente, os bocais para enchimento. Os bocais costumam ser dotados de flanges, que aumentam a resistência ao rasgo nesta região crítica que recebe diretamente os esforços dos ressaltos da tubulação de bombeamento. Ao fim da produção, o produto é enrolado e recebe embalagem e identificação adequados para transporte e armazenamento (SOUZA; PALMA, 2018). A Figura 1 apresenta as etapas de fabricação mencionadas.

Figura 1 – Processo de fabricação de um tubo geotêxtil.



Fonte: Souza e Palma (2018).

Os tubos podem ser fabricados a partir de geotêxtil tecido, não tecido ou com a associação de ambos. As diferenças entre os tipos de geotêxteis estão intimamente ligadas ao processo produtivo. Os tecidos, basicamente são fabricados em teares que tramam os fios ou laminetes em duas direções perpendiculares entre si: a trama perpendicular à direção de fabricação e o urdume, a própria direção de fabricação (VERTEMATTI, 2001). Os geotêxteis não tecidos, por sua vez, são fabricados pela agulhagem de fibras cortadas ou de filamentos contínuos.

Nos geotêxteis tecidos, as aberturas são uniformemente distribuídas ao longo do entrelaçamento dos fios, sendo estas também de tamanhos regulares. Assim, no processo de filtração e retenção das partículas, estas sofrem um único confronto. Ao percorrer o interior de um geotêxtil não tecido, uma partícula descreve um percurso em que deve atravessar vários confrontos não-lineares com poros de diferentes tamanhos, formados por três ou mais fibras. O percurso se dá, portanto, ultrapassando os poros até se confrontar com um de dimensão inferior ao tamanho da partícula. A partícula pode desviar-se e atravessar totalmente o filtro ou esse ponto de confronto pode bloqueá-la (AGUIAR; VERTEMATTI, 2015). Assim nos tubos geotêxteis não tecidos é esperado maior retenção de finos e percolado de melhor qualidade, estando mais límpido, quando comparado com o tecido, sem aplicação de polímero. O uso de

polímero aumenta o diâmetro das partículas e conseqüentemente, sua retenção, pelos dois tipos de geotêxtil.

O geotêxtil tecido apresenta como vantagem valores de resistência à tração mais elevados em comparação ao não tecido de mesma massa por unidade de área. Em relação ao tubo geotêxtil, esta é uma propriedade que influencia diretamente na altura máxima de enchimento durante o bombeamento e, conseqüentemente, no volume de armazenamento: abaixo este tópico será mais bem discutido, mas em linhas gerais, quanto maior a altura de enchimento, mais circular será a seção transversal do tubo e maiores serão os esforços solicitantes, por conseqüência, maior deve ser a resistência do geotêxtil.

Os tubos também podem ser fabricados pela associação dos dois tipos de geotêxteis. O resultado da combinação faz com que a estrutura apresente o atributo positivo dos dois componentes (KOERNER, 2016).

Os tubos geotêxteis podem ser aplicados em diferentes obras civis e ambientais. Com a função de desaguamento de rejeitos, podem ser aplicados em mineradoras. Para desaguamento de resíduos, em Estações de Tratamento de Água e Esgoto, em indústrias e em quaisquer lugares que produzam material com alto teor de umidade. Outra aplicação é no desassoreamento de rios e lagos, em que os sedimentos depositados podem ser dragados para dentro dos tubos, retendo a fração sólida e retornando a água drenada ao corpo hídrico.

Os tubos podem ser também empilhados após o enchimento, formando uma estrutura densa e estável. Nestes casos, seu preenchimento além de poder ser realizado com lodos e lamas, pode ser feito com areia dragada do fundo do mar ou com concreto. Estas estruturas podem ter finalidade de contenção, diques, estruturas costeiras, marinhas ou fluviais.

Este trabalho se refere a implantação de tubos geotêxteis em Estações de Tratamento de Água, onde a aplicação restringe-se apenas ao desaguamento de lodo, sendo utilizado como alternativa às soluções convencionais (filtro prensa, centrífuga, leitos de drenagem...).

## 2.1 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs)

As ETAs são verdadeiras fábricas de produção de água potável. Como exemplo, apenas pelas unidades da empresa Sabesp, são tratados mais de 119 mil litros de água por segundo (SABESP, 2020).

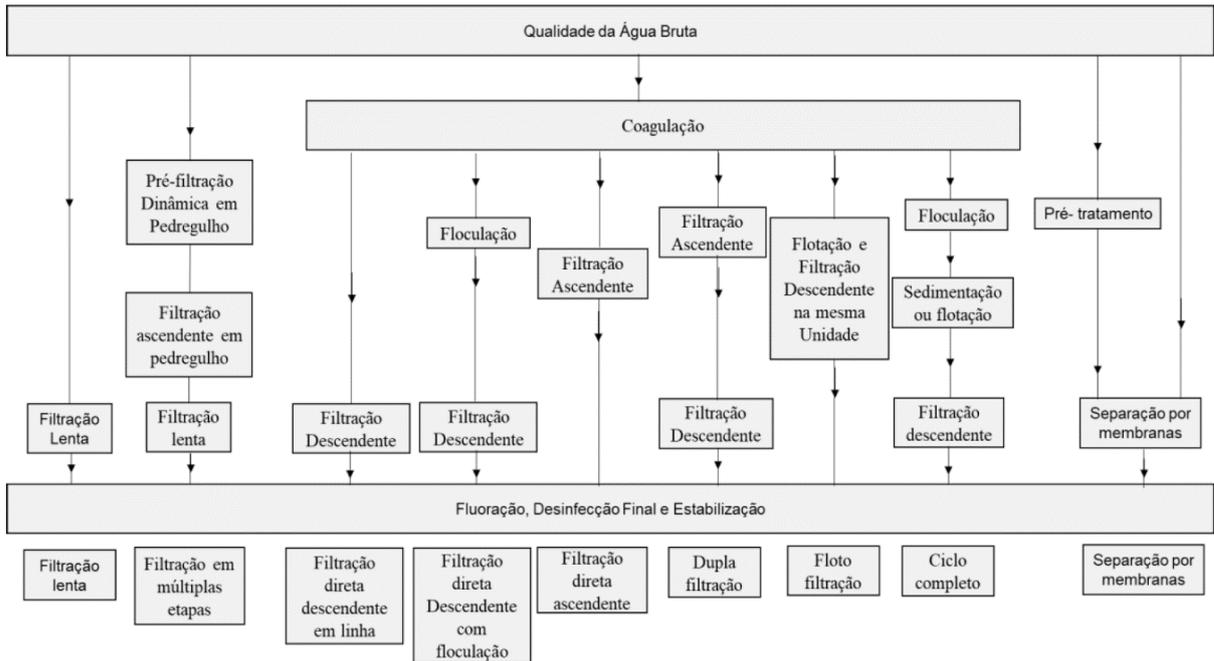
As tecnologias de tratamento de água podem ser divididas, sob o ponto de vista da qualidade da água bruta, em dois grupos: com e sem coagulação. Elas podem também ser ou não precedidas de pré-tratamento. A Figura 2 mostra uma classificação geral das principais tecnologias de tratamento de água disponíveis.

O processo de coagulação é a principal diferença entre as tecnologias de ciclo completo e as de filtração direta. Enquanto nas ETAs de ciclo completo a coagulação é predominantemente realizada no mecanismo de varredura (com produção de excesso de precipitados do metal do coagulante), nas de filtração direta a coagulação ocorre no mecanismo de neutralização de cargas das impurezas presentes na água bruta. Por consequência, tanto a massa seca quanto o volume de resíduos gerados nas ETAs de ciclo completo são maiores que aqueles observados nas ETAs de filtração direta (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

A escolha da tecnologia mais adequada para tratamento da água bruta deve ser guiada pelos seguintes fatores: i) características da água bruta; ii) custos envolvidos; iii) manuseio e confiabilidade dos equipamentos; iv) flexibilidade operacional; v) localização geográfica e características da população (LIBÂNIO, 2016).

A realização de um estudo econômico-financeiro das alternativas tecnicamente sustentáveis sempre conduz àquela de menor custo global presente (implantação, operação e manutenção) para o período de projeto considerado, mas quando é analisada a disponibilidade de verba para implantação, normalmente a escolha é adotada com base no menor custo de implantação, independentemente dos gastos com operação e manutenção ao longo do período de projeto (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

Figura 2 – Classificação geral das tecnologias de tratamento de água.

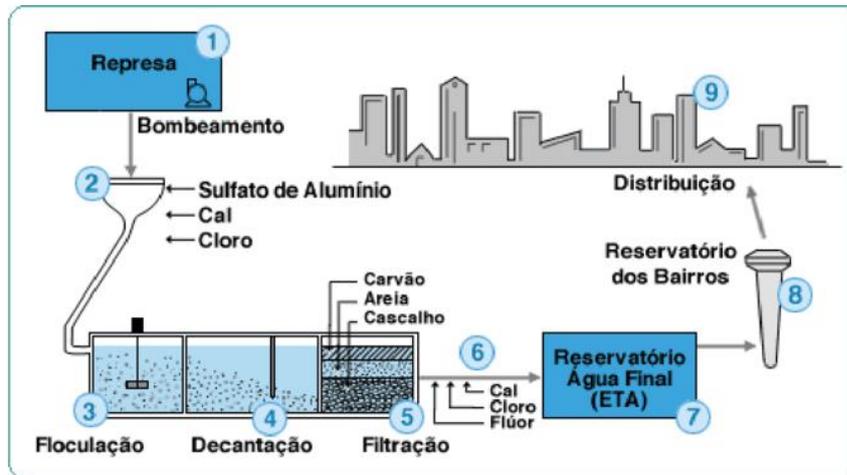


Fonte: Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012).

De acordo com Libânio (2016), a escolha da tecnologia de tratamento segundo critério adotado pela Resolução número 357 de 2005 do CONAMA (BRASIL, 2005) e pela ABNT NBR 12216 (ABNT, 1992) na maioria das vezes converge para a escolha do tratamento convencional, informação essa confirmada por Achon, Barroso e Cordeiro (2013), que apresentam que no Brasil existem cerca de 7.500 estações de tratamento de água (ETAs) projetadas, em sua grande maioria, com ciclo completo.

O processo convencional de tratamento de água recebe essa denominação por ser comumente encontrado na maioria das ETAs (SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÀGUA E ESGOTO – SAAE, 2006). Partindo da captação, é composto pelas seguintes unidades: adutora, floculadores, decantadores, filtros e reservatórios, de onde a água tratada será distribuída à população. A empresa Sabesp apresenta em seu site um fluxograma que descreve esse processo (Figura 3).

Figura 3 – Fases do tratamento de água em uma ETA de ciclo completo.



Fonte: Sabesp (2020).

O processo inicia-se com a captação de água realizada em corpos hídricos, como rios e mananciais. Como consequência, partículas sólidas são carregadas juntamente com a água.

Passa-se então às fases de tratamento:

- a) pré-cloração – é adicionado o cloro assim que a água chega à estação para facilitar a retirada de matéria orgânica e metais;
- b) pré-alcalinização – a água recebe cal ou soda, que servem para ajustar o pH aos valores exigidos nas fases seguintes do tratamento;
- c) coagulação – nesta fase é adicionado sulfato de alumínio, cloreto férrico ou outro coagulante, seguido de intensa agitação mecânica, para desestabilizar eletricamente as partículas sólidas e tornar a etapa de floculação mais fácil;
- d) floculação – após a coagulação, há uma mistura lenta da água, que serve para provocar a formação de flocos;
- e) decantação – neste processo, a água passa por grandes tanques, para que os flocos formados na etapa anterior decantem;
- f) filtração – logo depois, a água atravessa os filtros responsáveis por reter as partículas remanescentes do processo de decantação;
- g) pós-alcalinização – em seguida, é feita a correção final do pH da água, para evitar corrosão ou incrustação das tubulações;

- h) desinfecção – é feita uma última adição de cloro antes da saída da água da estação de tratamento. ela garante que a água fornecida chegue isenta de bactérias e vírus até a casa do consumidor;
- i) fluoretação – adição de flúor à água.

Assim, os resíduos em uma ETA de ciclo completo advêm principalmente das limpezas ou descargas dos decantadores e das lavagens dos filtros.

Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012), em termos volumétricos a maior concentração de resíduos está na água de lavagem de filtros, enquanto em termos mássicos, a maior concentração de resíduos está presente nos decantadores, onde o sistema de remoção dos lodos é responsável por parte das características finais destes, principalmente no que se refere à concentração de partículas. Os autores também afirmam que independentemente do tipo de decantador (convencional ou de alta taxa), a limpeza manual geralmente é realizada entre períodos de 15 dias a 3 meses. Conforme Richter (2009), a quantidade de sólidos totais presentes no lodo de ETA varia de 0,1 a 4 % da massa total.

A Norma Brasileira ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004) apresenta em seu item 3.1 a definição de resíduos sólidos, sendo que os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água ficam incluídos nesta definição:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 2004).

Portanto, o lodo produzido em ETAs deve receber tratamento e disposição compatíveis com as legislações de resíduos sólidos urbanos. Porém, segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), em 2008, o Brasil possuía 5564 municípios, dos quais 56,4% utilizavam mananciais superficiais para seu abastecimento e em 26,7% destes, as fontes de captação recebiam algum tipo de poluição ou contaminação. Do total de municípios brasileiros, 37,7% geravam lodo nas ETAs e cerca de 67,4% dispunham os resíduos em rios, geralmente, sem qualquer tipo de tratamento. Não foram utilizados os dados da PNSB de 2017, pois esta foi dividida em duas etapas: a primeira

investigou os serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário e a segunda, que ainda não foi publicada, será a que abrangerá os serviços de manejo de resíduos sólidos e águas pluviais (IBGE, 2020). Estas estatísticas nos mostram um ciclo que se retroalimenta em termos poluitivos.

O aumento da fiscalização e o rigor das legislações, tem feito, com o passar dos anos, com que as ETAs busquem alternativas de tratamento de seus resíduos. A melhor forma de solucionar a incorreta destinação dada ao lodo gerado é a criação de uma Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR) dentro das próprias ETAs, para que o resíduo saia da estação pronto para disposição.

A primeira etapa do tratamento constitui, então, no desagamento do lodo, que pode ser efetuado por meio de sistemas mecanizados (centrífuga, filtro prensa de esteira, filtro prensa de placas, prensa desaguadora tipo parafuso etc.), naturais (lagoa de lodo) e por filtração em leito de secagem, leito de drenagem e em SCRs.

Com qualquer técnica de desagamento é desejável a obtenção de torta de lodo com teor de sólidos totais superior a 20% (massa/massa) (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012). Para além deste objetivo, a escolha da melhor alternativa de desagamento deve incluir análises sobre custos de implantação, operação e manutenção, além de desempenho e adequabilidade à realidade da ETA, pois algumas operam em lugares de difícil acesso e com poucos recursos financeiros.

Dentro deste panorama, o uso de tubos geotêxteis para desagamento do lodo, foco do presente trabalho, tem se mostrado uma alternativa, sendo possível a implantação de uma UTR interna a ETA utilizando esta tecnologia, com baixos investimentos iniciais e de manutenção, como apresentado anteriormente na comparação de custos entre sistemas naturais e mecanizados de desagamento.

A infraestrutura necessária ao bom funcionamento de uma UTR com a utilização de tubos geotêxteis é mostrada por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) e através de exemplos de projetos da aplicação bem sucedida de SCRs em ETAs executados pela empresa Hidrosan Engenharia SS Ltda, os autores apresentam um guia para dimensionamento das unidades. A seguir, uma breve descrição do sistema.

O início do tratamento se dá pelo recebimento do lodo.

As bateladas de descarga de lodo, sejam elas provenientes de filtro ou decantador, devem ser enviadas a um tanque de equalização. O objetivo do tanque é promover a homogeneização do lodo e permitir que o bombeamento para o tubo

geotêxtil seja regular, realizado sob vazão e pressão determinadas em projeto. O efluente homogeneizado é então bombeado para o barrilete.

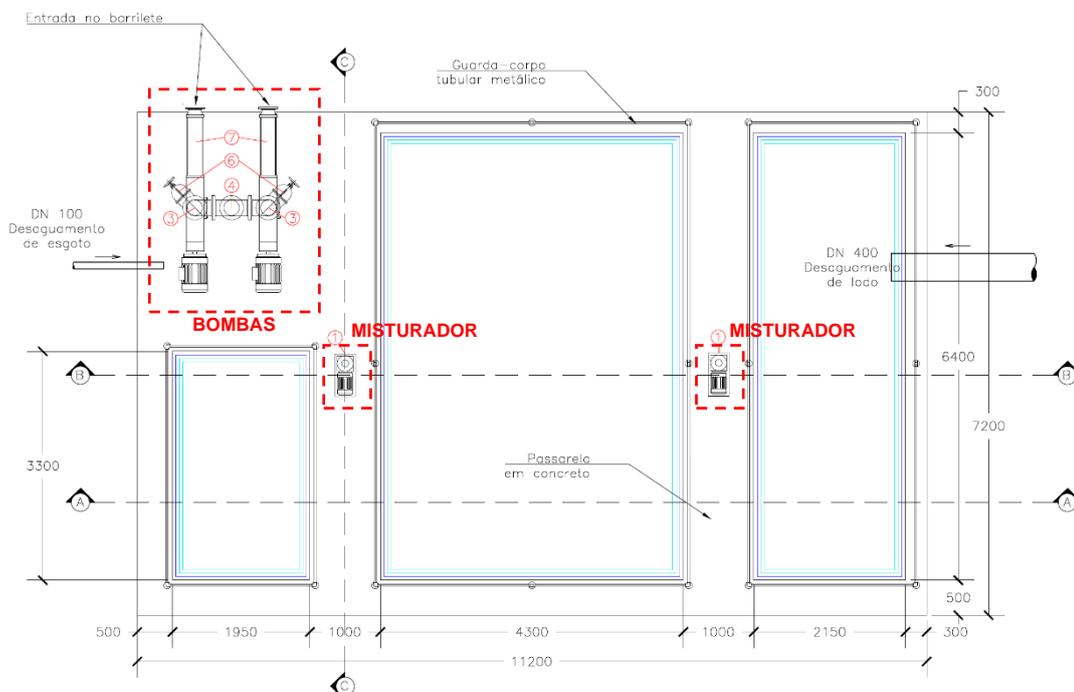
O barrilete é um conjunto de tubulações onde será injetado polímero através de um tanque dosador. Seguindo por essa tubulação, uma sequência de conexões forma uma chicana misturadora para homogeneizar a mistura (lodo + polímero), chegando a um *manifold*, que distribuirá o lodo para um dos tubos geotêxteis dispostos sobre uma base drenante.

A base drenante, em casos de remoção cíclica dos tubos para envio ao aterro, deve ser prevista, por exemplo, em concreto, permitindo o uso de máquinas de grande porte, sem danificar a estrutura.

A água efluente dos tubos geotêxteis, já com qualidade para retornar ao corpo hídrico, deverá ser conduzida por uma tubulação até encontrar a rede condutora.

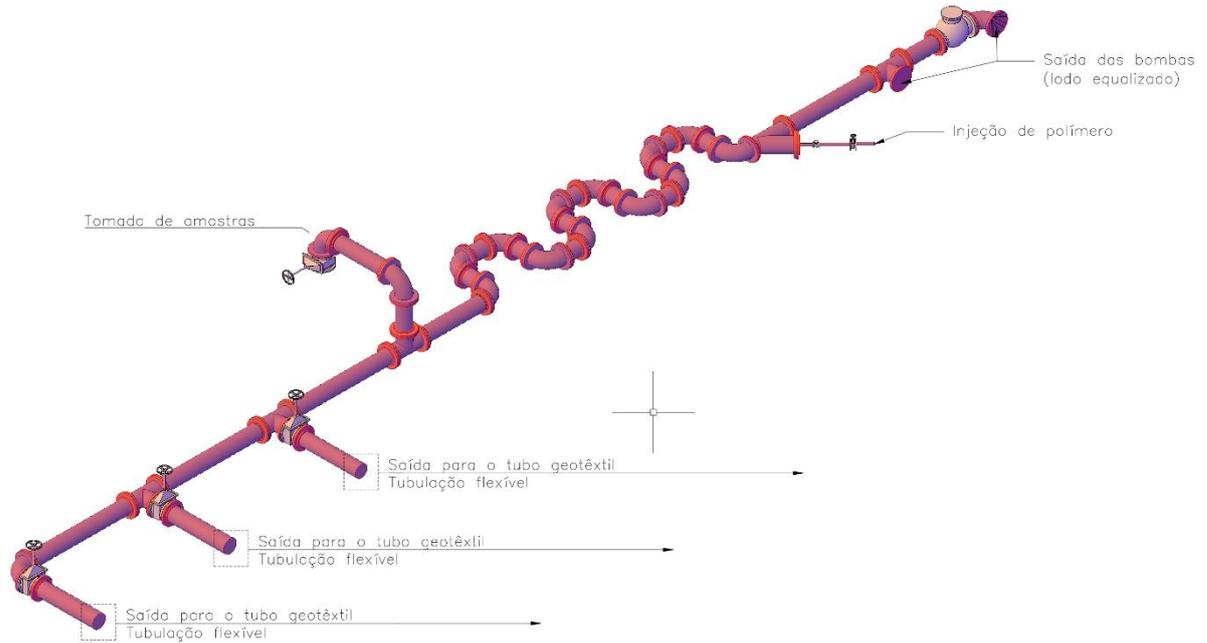
Outra opção é a aplicação do polímero diretamente no tanque de equalização. Indica-se, ao realizar esse tipo de operação, prever misturadores com rotação adequada para floculação e bombas do tipo helicoidal, para não haver a quebra dos flocos. As Figuras 4 a 6 apresentam a infraestrutura descrita.

Figura 4 – Exemplo de tanque de equalização com bombas e misturadores.



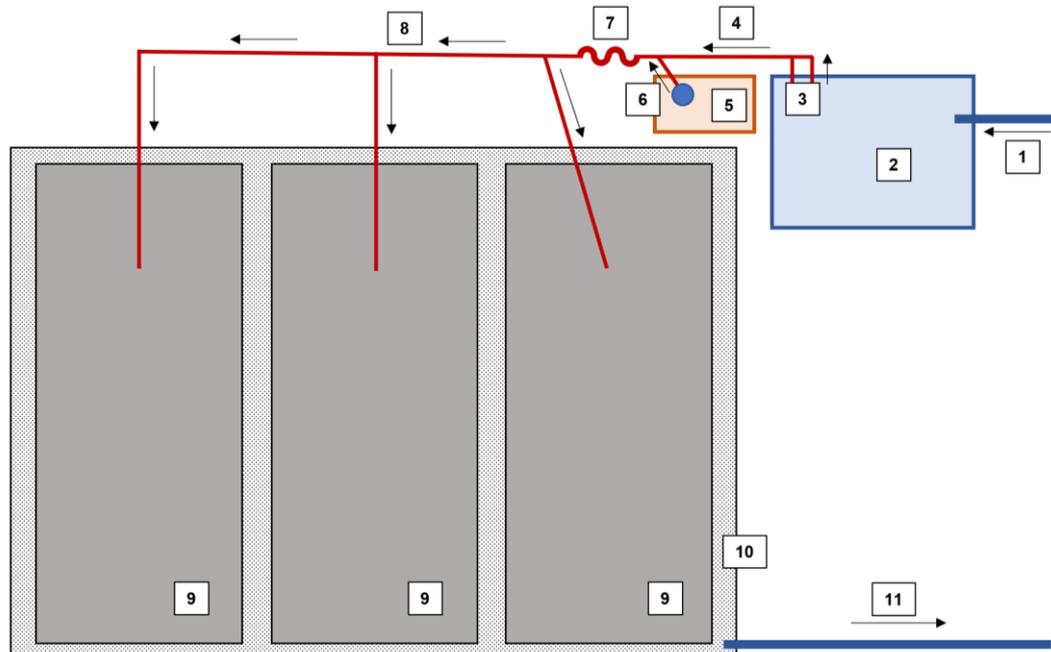
Fonte: adaptado de Estruturatta Engenharia LTDA (2019).

Figura 5 – Exemplo de barrilete com chicana e inserção de polímero.



Fonte: adaptado de Estrutturatta Engenharia LTDA (2019).

Figura 6 – Esquema da infraestrutura necessária para o desagüamento de lodo de ETA através de tubos geotêxteis.

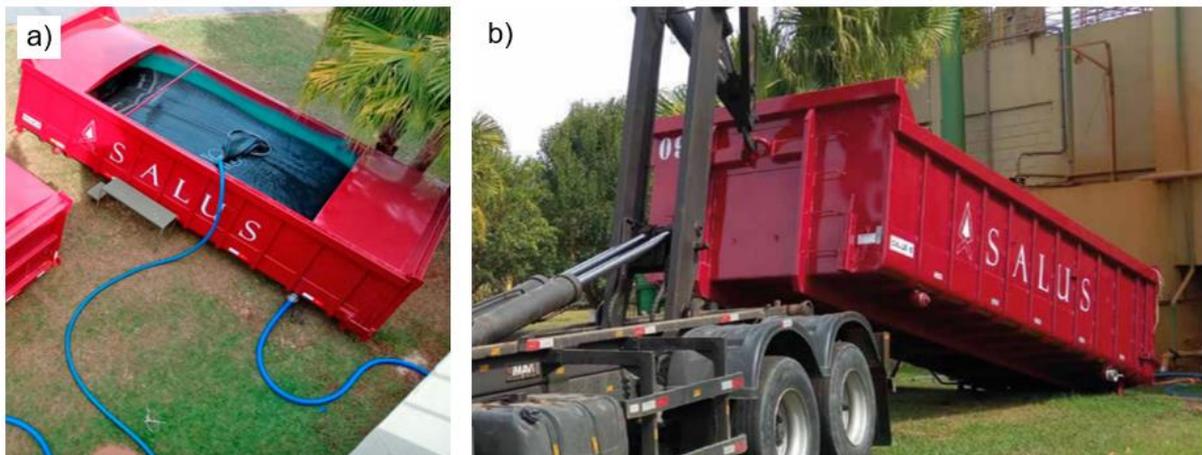


1	Descarga do lodo proveniente dos filtros e/ou decantadores	7	Chicana misturadora
2	Tanque de equalização	8	Barrilete com manifold para direcionamento do lodo para os tubos geotêxteis
3	Bombas	9	Tubos geotêxteis
4	Tubulação de recalque	10	Base drenante
5	Instalações de apoio (pia, abrigo das instalações elétricas, armazenamento de polímero, tanque de polímero)	11	Captação da água percolado para retorno ao corpo hídrico
6	Inserção do polímero na tubulação		

Fonte: adaptado de Estrutturatta Engenharia LTDA (2019).

Outra opção de berço para acomodação dos SCR's são as caçambas especiais drenantes, que são estruturas móveis que utilizam os tubos geotêxteis como um refil a ser preenchido pelo lodo em seu interior (Figura 7a). Nessa composição, o envio do material desaguado para aterro é facilitado (Figura 7b).

Figura 7 – a) Preenchimento do SCR no interior da caçamba b) Envio facilitado do material desaguado para o aterro através de engate na caçamba.



Fonte: Salus Engenharia (2020)

Seja através das caçambas especiais drenantes ou pela abertura do tubo geotêxtil diretamente no berço, até aqui, a opção de destinação discutida envolveu o envio da torta de lodo para aterro.

Entretanto, duas outras opções de destinação não devem ser esquecidas: a disposição em células de confinamento criadas dentro da própria ETA ou a reutilização do material em outras aplicações.

As células de confinamento demandam que a ETA possua grandes áreas que possam ser utilizadas para este fim. A construção dos leitos de disposição dos SCR's é, então, executada de forma a possuir as camadas impermeabilizantes necessárias para proteção ambiental, seguidas de camadas drenantes para condução do percolado. Os SCR's são preenchidos já na posição final de disposição e podem ser empilhados. Quando atingida a capacidade da área, a pilha de material desaguado recebe um sistema de cobertura apropriado.

No intuito de promover a redução da disposição de resíduos sólidos, alternativas de reuso do lodo após o desaguamento têm sido o foco de muitas pesquisas, podendo-se citar a fabricação de materiais da construção civil como tijolos e fabricação de materiais cerâmicos (BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017;

BIDONE; SILVA; MARQUES, 2001; CORNWELL, 1999; SOARES *et al.*, 2009). Além disso, segundo Richter (2001), pode ser utilizado na pavimentação de estradas e na produção de cimento. Tsutuya e Hirata (2001) citam que o lodo também pode ser utilizado no cultivo de grama comercial, sendo aplicado na fase líquida ou após sua desidratação proporcionando aumento na aeração e na capacidade de retenção de líquido no solo, além de fornecer nutrientes às plantas.

## 2.2 PROPRIEDADES DO LODO

Os resíduos gerados em ETAs consistem em duas fases: sólida e líquida, entretanto, em termos percentuais, a maior parte de sua composição corresponde à fase líquida.

Segundo Jacomassi (2009), as características dos resíduos influenciam na remoção de água e conseqüentemente são essenciais para definição do sistema a ser utilizado para desaguamento e para viabilizar seu gerenciamento.

Estas características podem ser agrupadas em função de sua importância e do objetivo do estudo, podendo-se classificar em: características ambientais (definidas pelas características físico-químicas) e características geotécnicas (CORDEIRO, 2001).

Os principais parâmetros que avaliam as características físico-químicas são: teor de sólidos (orgânicos e inorgânicos), turbidez, cor, capacidade de troca catiônica (CTC), pH, metais, DQO, entre outros, sendo os mais importantes o teor de sólidos e a turbidez (APARICIO-ARDILA, 2020).

Já a caracterização geotécnica é dada pela massa específica dos sólidos, tamanho e distribuição das partículas, limites de plasticidade e de liquidez, resistência específica, respostas ao aquecimento e resfriamento e sedimentabilidade (CORDEIRO, 2001).

Dado que não existem normas específicas para a realização de ensaios geotécnicos com resíduos de ETA, os pesquisadores têm utilizado aquelas destinadas aos solos, as quais devem sofrer algumas modificações para atender as características do lodo (MONTALVAN, 2016).

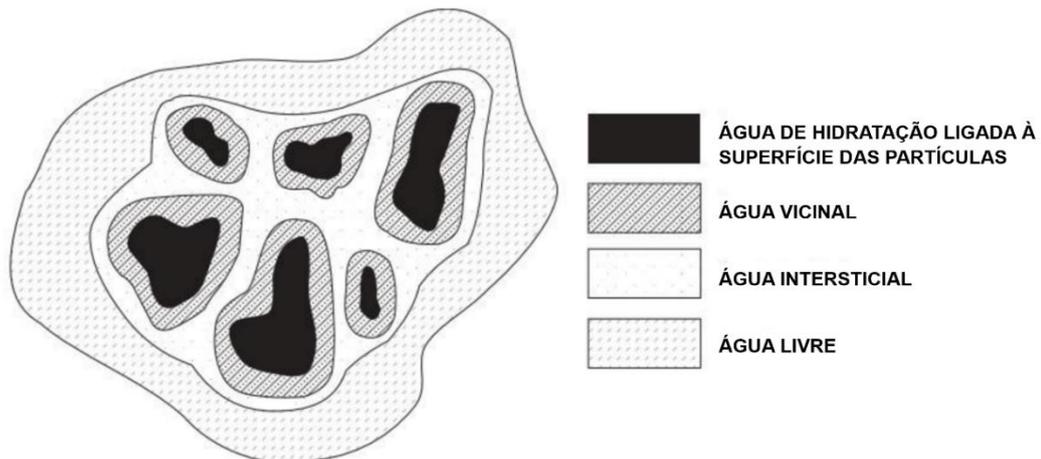
Dentre os parâmetros considerados não tradicionais necessários para a caracterização do lodo, o tamanho das partículas é de muita importância. A remoção de água livre dos lodos é condicionada pelo tamanho das partículas, o qual está

relacionado com a resistência específica, que define a resistência oferecida pelo lodo à passagem de água (o inverso da permeabilidade ou condutividade hidráulica) (MONTALVAN, 2016).

Os lodos dos decantadores apresentam na sua maioria partículas de pequeno tamanho (fração argila e silte), o que significa um aumento da resistência específica, e quanto maior a resistência específica, menor a capacidade de drenagem de água (CORDEIRO, 1999).

Smollen e Kafaar (1994) classificam a água presente em um floco de lodo em quatro estados, conforme mostra a Figura 8. Em ordem crescente de dificuldade de separação estão: *água livre* a qual não está associada com as partículas sólidas, *água intersticial ou capilar* que se encontra presa nos interstícios dos flocos, *água vicinal* que se encontra presa à superfície da partícula por meio de pontes de hidrogênio e por último a *água de hidratação* que está quimicamente ligada à superfície das partículas sólidas. As quantidades das frações de água presentes nos flocos determinam o desempenho dos sistemas de desaguamento.

Figura 8 – Distribuição da água no floco de lodo.



Fonte: Smollen e Kafaar (1994).

### 2.3 DESAGUAMENTO

O desaguamento consiste na remoção da água distribuída nos flocos de lodo. Em outras palavras, busca-se remover a maior quantidade possível da fração aquosa, retendo apenas os sólidos. Na macro escala, é uma operação na qual se procura

aumentar o teor de sólidos, com conseqüente redução de volume (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

Em um tubo geotêxtil, este processo ocorre em ciclos de enchimento e deságue: o enchimento se inicia com o acionamento da bomba (Figura 9) e o desaguamento, imediatamente após o início do bombeamento.

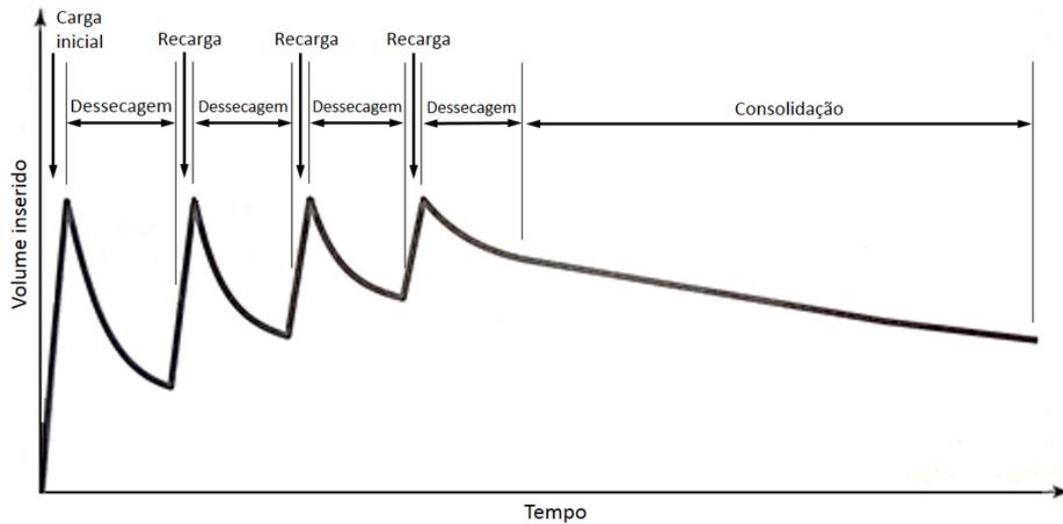
Figura 9 – Com o acionamento da bomba, inicia-se o enchimento do tubo geotêxtil, que imediatamente após, começa a desaguar.



Fonte: a autora.

Após atingida a altura máxima de enchimento, a bomba é desligada e espera-se, através da continuidade do desaguamento, a redução de volume para nova recarga (Figura 10). A cada novo ciclo, o volume retido vai se acumulando, diminuindo a capacidade volumétrica disponível em cada recarga.

Figura 10 – Ciclos de enchimento e deságue ao longo do tempo.



Fonte: Vertematti (2015).

Pode-se definir o teor de sólidos de uma amostra em termos da sua massa (ou peso) ou do seu volume, conforme as Equações 1 e 2 respectivamente:

$$\% \text{ de sólidos}_{\text{massa}} = \frac{\text{massa de sólidos}}{\text{massa de sólidos} + \text{massa de água}} \times 100 \quad (1)$$

$$\% \text{ de sólidos}_{\text{volume}} = \frac{\text{volume de sólidos}}{\text{volume de sólidos} + \text{volume de água}} \times 100 \quad (2)$$

Vertematti (2015) apresenta uma expressão para o cálculo do teor de sólidos em peso reescrita em função dos principais parâmetros utilizados nesse tipo de aplicação (Equação 3), em que 'torta' pode ser definida como o produto resultante da dessecação de um lodo ou lama:

$$TSP_{t,\text{peso}} = \frac{TSP_{0,\text{peso}} \gamma_0 V_0}{V_t \gamma_t} \quad (3)$$

- $TSP_{0,\text{peso}}$  – teor de sólidos totais, em peso, do lodo;
- $\gamma_0$  – peso específico do lodo;
- $V_0$  – volume de lodo inserido no tubo geotêxtil;
- $TSP_{t,\text{peso}}$  – teor de sólidos totais, em peso, da torta gerada dentro do tubo geotêxtil;
- $\gamma_t$  – peso específico da torta;
- $V_t$  – Volume da torta após desaguamento.

Os pesos específicos, tanto do lodo como da ‘torta’, podem ser obtidos a partir da massa específica dos sólidos ( $\delta_{sólidos}$ ) e do teor de sólidos em peso ( $TSP_{peso}$ ), por meio da Equação 4:

$$\gamma = \frac{(100 \times \delta_{sólidos})}{[100 \times \delta_{sólidos} - TSP_{peso} \times (\delta_{sólidos} - 1)]} \times 9,81 \quad (4)$$

Lawson (2008) faz a proposição da Equação 5 para relacionar volume de uma amostra com seu teor de sólidos em volume ( $TSP_{volume}$ ): suponha que o tubo geotêxtil receba por bombeamento um volume inicial ( $V_0$ ) com lodo com teor de sólidos inicial ( $TSP_{0,volume}$ ). Após um período de tempo ( $t$ ), durante o qual o lodo desaguou pelo tubo geotêxtil, o volume no tubo reduziu para ( $V_t$ ) com um teor de sólidos resultante aumentado para ( $TSP_{t,volume}$ ). Supondo-se que a quantidade de sólidos que escaparam seja desprezível e que o teor de sólidos é homogêneo por todo tubo, tem-se a relação apresentada na seguinte expressão:

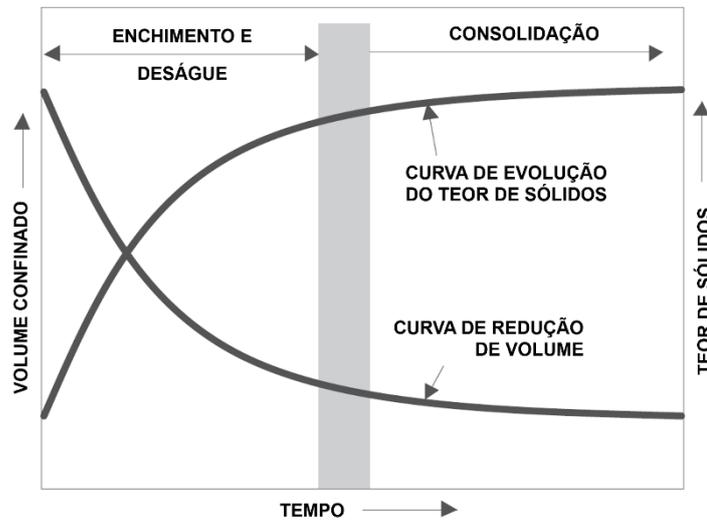
$$\frac{V_t}{V_0} = \left( \frac{1 - TSP_{t,volume}}{TSP_{t,volume}} \right) / \left( \frac{1 - TSP_{0,volume}}{TSP_{0,volume}} \right) \quad (5)$$

Ainda segundo Lawson (2008), outro parâmetro importante é a redução de volume ( $\Delta V$ ) que ocorrerá entre o lodo bobeadado e o lodo desaguado para um determinado aumento de teor de sólidos, calculado segundo Equação 6:

$$\Delta V = \frac{V_0 - V_t}{V_0} = 1 - \left[ \left( \frac{1 - TSP_{t,volume}}{TSP_{t,volume}} \right) / \left( \frac{1 - TSP_{0,volume}}{TSP_{0,volume}} \right) \right] \quad (6)$$

A Figura 11 mostra a inter-relação entre volume e teor de sólidos. Um ponto importante a se observar é que os processos são mais acelerados na fase de deságue e perdem velocidade quando se inicia a fase de consolidação.

Figura 11 – Curvas de evolução do teor de sólidos e redução do volume.



Fonte: adaptado de Lawson (2008).

Após os ciclos de enchimento, quando a tubulação é removida do bocal do tubo geotêxtil, é possível iniciar a coleta de amostras e então obter a evolução do teor de sólidos ao longo do tempo na fase de consolidação. Essa evolução sofre influência das condições climáticas, pois o lodo passa a ser desaguado principalmente por evaporação, sendo temperatura e precipitações fatores interferentes na evolução.

Existem três critérios gerais que caracterizam o desempenho para desidratação de resíduos segundo Lawson (2008): o primeiro trata da redução significativa no volume contido (e um ganho comparável na concentração de sólidos) e a ocorrência dessa evolução durante um período de tempo relativamente curto; o segundo trata sobre a possibilidade de haver uma perda inicial de sólidos através do tubo geotêxtil, mas que esta deve cessar em um período relativamente curto após o início do desaguamento com a formação do denominado “*filter cake*”, e, por fim, que a qualidade do efluente deve permanecer constante com o passar do tempo.

Esses três critérios serão discutidos a seguir.

A evolução do teor de sólidos em um tempo relativamente curto depende, como apresentado no item 0, das propriedades do resíduo. Entretanto, existem duas maneiras de acelerar o desaguamento, aumentando a taxa de desidratação (LAWSON, 2008):

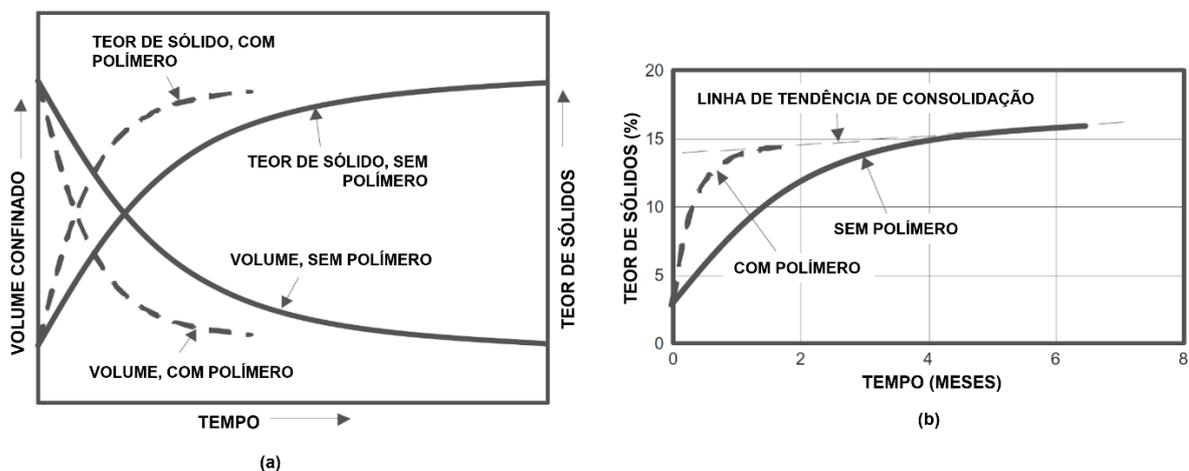
- a) pela adição de aceleradores químicos de desidratação nos resíduos antes da entrada no tubo geotêxtil; e/ou

b) com o uso de um potencial eletro-osmótico dentro do tubo de geotêxtil (ainda utilizada em escala limitada).

Silva (2017) explica que floculantes são aditivos químicos comumente adicionados em misturas que contenham sólidos em suspensão visando acelerar o processo de sedimentação ou aumentar a eficiência de retenção em filtros através da aglutinação, ou floculação dos coágulos existentes em uma mistura aquosa. Ainda segundo a autora, ao adicionar floculantes no processo de desaguamento utilizando tubos geotêxteis, tem-se como objetivo a formação de pontes químicas entre partículas em suspensão para formação de grumos ou flocos, o que permite que a retenção seja mais eficiente e proporcionando também a diminuição do risco de colmatção do geotêxtil pelo arraste de partículas finas.

A Figura 12 apresenta gráficos comparativos de desaguamento com e sem a utilização de polímero.

Figura 12 – Comparação da evolução do teor de sólidos com e sem o uso de polímero, sendo a) panorama genérico e b) evolução do teor de sólidos com o tempo em meses.



Fonte: adaptado Lawson (2008).

Avancini (2017) propõe comparar a taxa de desaguamento do lodo com e sem polímero floculante para estabelecer a eficácia do uso deste por meio da Equação 7:

$$EP = \frac{TD_{\text{lodo+polímero}} - TD_{\text{lodo}}}{TD_{\text{lodo}}} \times 100(\%) \quad (7)$$

onde:

- $EP$  – Eficácia do polímero;
- $TD_{\text{lodo}}$  - Taxa de desaguamento ocorrida no ensaio sem adição de polímero ao lodo, em  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;
- $TD_{\text{lodo+polímero}}$  - Taxa de desaguamento ocorrida no ensaio com adição de polímero ao lodo, em  $\text{cm}^3/\text{s}$ .

Sendo que a taxa de desaguamento é calculada dividindo o volume de efluente coletado pelo tempo de desaguamento.

Apesar da expectativa de aumento da eficiência do processo com a utilização de floculantes, é importante que sejam realizados ensaios para verificação da reação deste tipo de polímero com o material a ser desaguado. Em testes realizados por Satyamurthy e Bhatia (2009), foi observado que o tipo e a concentração de alguns polímeros pode até mesmo ter efeito reverso e aumentar o tempo de desaguamento.

A escolha do polímero seguidos da determinação da concentração e dosagem ótima podem ser feitas por meio de Jar Test e de Ensaio de Cone (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012; KHACHAN *et al.*, 2014; MAURER *et al.*, 2012; SATYAMURTHY; BHATIA, 2009). Além destes, há também o ensaio realizado com tubo geotêxtil de pequenas dimensões (50 cm x 50 cm) que pode ser utilizado para determinar a taxa de fluxo de água e retenção dos sólidos em suspensão segundo a ASTM D7880 (ASTM, 2011).

### 2.3.1 Jar test

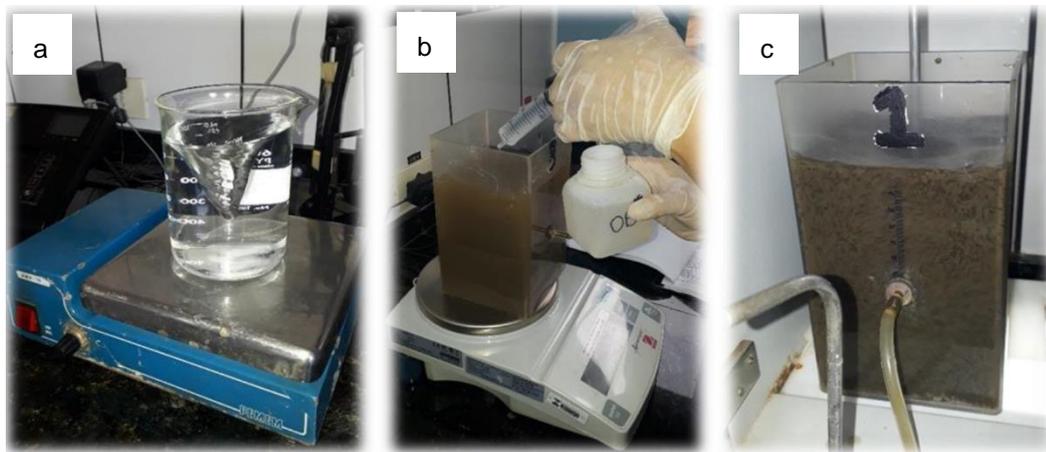
A finalidade do ensaio de floculação feito pelo *Jar Test* é determinar as dosagens ótimas dos reagentes através de tentativas e comparação. O ensaio é regulamentado pela ASTM D2035 (ASTM, 2019).

O equipamento possui posições múltiplas para posicionamento de amostras de volumes iguais do lodo in natura (de 1000 ou 1500 ml) em frascos ou béqueres apropriados, de forma que em cada posição, uma pá agitadora é inserida no recipiente e pode ser rotacionada sem contato com as paredes, em frequência determinada por norma.

O procedimento de ensaio pode ser resumido pela adição em cada frasco de produtos químicos em dosagens e condições experimentais, até que por efeito comparativo dos resultados atingidos nas amostras, se identifique condições ótimas de floculação-coagulação, bem como de parâmetros como cor, turbidez, pH esperados para fração líquida.

O Jar Test, apresentado na Figura 13, pode ser utilizado como etapa prévia ao Ensaio de Cone.

Figura 13 – Ensaio de desaguamento em cone: (a) preparação de polímero em agitador magnético de bancada, (b) adição de polímero no jarro de Jar Test e (c) ensaio Jar Test.



Fonte: Aparicio-Ardila (2020).

### 2.3.2 Ensaio de cone

Manuais de execução do *Ensaio de Cone* (Figura 14) são fornecidos por fabricantes de tubos geotêxteis e costumam seguir as mesmas diretrizes: verter 1 L de lodo homogeneizado sob cone e verificar o volume percolado aos 30 seg, 5 min e 25 min após o início do ensaio. Passados 25 minutos, medem-se os parâmetros físico-químicos do percolado (OBER, 2019; TENCATE, 2012).

Este ensaio, apesar de simples, fornece parâmetros importantes de desempenho do tubo geotêxtil em relação ao resíduo em estudo, como a velocidade de desaguamento, a verificação da retenção de partículas sólidas e a qualidade do percolado. O ensaio pode ser executado com as diferentes amostras obtidas com aditivos químicos no *Jar Test* e propiciar, por análise comparativa, a escolha da amostra que apresentou os melhores resultados para as características citadas.

Também é indicado pesar o cone antes e após o ensaio para obtenção da massa de sólidos retida e assim, obter indicativos do teor de sólidos logo após o desaguamento, sendo importante haver dados da amostra inicial para tal.

Figura 14 – Emsaio de cone.



Fonte: Ober (2019).

### 2.3.3 Ensaio com tubo geotêxtil em escala reduzida ASTM D7880 (ASTM, 2011)

Para realização deste ensaio é utilizada uma bolsa fabricada a partir do mesmo material do tubo geotêxtil, costurada com dimensões aproximadas de 53 cm x 53cm, formando um invólucro fechado com capacidade volumétrica em torno de 28 l.

A bolsa deve conter um adaptador fêmea de 2,0 polegadas de diâmetro do tipo flange de policloreto de vinila (PVC) rosqueável instalado na parte superior central da bolsa. Neste adaptador, conecta-se um tubo de PVC, também de 2 polegadas de diâmetro, com comprimento livre aproximado de 76 cm (30 polegadas).

Esse conjunto é apoiado sob um cavalete e logo abaixo, deve-se colocar um recipiente para coletar o percolado que flui da bolsa durante o ensaio.

A execução é feita vertendo-se, com a ajuda de um funil, entre 55 l e 95 l do resíduo previamente homogeneizado pelo tubo de PVC.

Como resultados deste ensaio, determina-se a taxa de fluxo do líquido que percola pela bolsa (mostrados em litros de água coletado no recipiente por intervalo

de tempo) e sólidos suspensos totais deste percolado em miligramas por litro ou partes por milhão.

A Figura 15 apresenta as etapas descritas.

Figura 15 – Emsaio com tubo geotêxtil em escala reduzida 1- lodo separado para ensaio; 2- estrutura do ensaio; 3- homogeneização do lodo; 4- lodo sendo vertido para interior da bolsa; 5- deságue; 6- lodo desaguado após o ensaio.



Fonte: adaptado de Tencate (2011).

## 2.4 LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM CORPOS HÍDRICOS

O retorno a um corpo hídrico do percolado dos tubos geotêxteis após o desaguamento deve ser feito cumprindo-se as legislações vigentes, que visam à proteção do meio ambiente.

A maior preocupação é com a qualidade do percolado, para que não polua e não influencie negativamente a fauna e a flora do local onde será lançado.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), dispõe na Resolução número 357 de 2005 (BRASIL, 2005) 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, tendo sido complementada pela Resolução número 430 de 2011 (BRASIL, 2011) que trata apenas sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes.

Em caso de não atendimento aos padrões normativos, o percolado deve passar por processo de tratamento. Outra possibilidade, seria o retorno do percolado ao sistema ou reuso em situações aplicáveis.

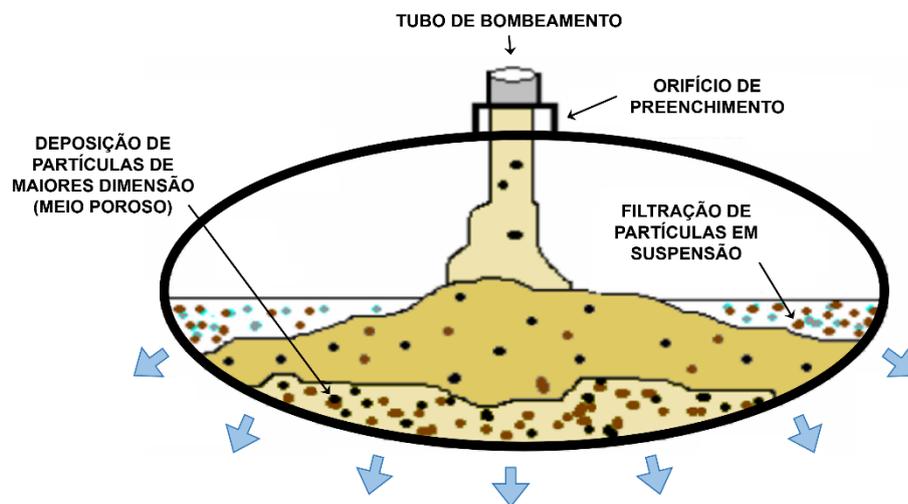
## 2.5 CONCEITOS HIDRÁULICOS APLICÁVEIS A TUBOS GEOTÊXTEIS

Para além da escala microscópica, em que o desaguamento consiste na remoção da água do floco de lodo, macroscopicamente é preciso separar as partículas sólidas da fração líquida, retendo-as no interior do tubo geotêxtil e permitindo a drenagem da água por meio do processo de filtração.

Durante o preenchimento de um tubo geotêxtil, as partículas maiores se depositam na porção inferior do tubo e, portanto, nesta região é possível observar a filtração de meios porosos, enquanto a filtração de partículas em suspensão ocorre no início do bombeamento e no topo e laterais do tubo (CASTRO, 2005; GAFFNEY *et al.*, 1999), conforme ilustrado na Figura 16.

A filtração de partículas em suspensão é um problema crítico pois, devido a perda de carga que ocorre quando a partícula carregada encontra o filtro geotêxtil, ela tende a se depositar em sua superfície, o que ocorre mesmo para partículas muito pequenas, bem menores que a abertura de filtração do elemento filtrante (URASHIMA; VIDAL, 1999).

Figura 16 – Zonas de filtração de material poroso e partículas em suspensão durante o processo de bombeamento/desaguamento.



Fonte: adaptado de Castro (2005).

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

Urashima e Vidal (1999) explicam que a colmatação ocorre quando as partículas carregadas pelo fluxo são depositadas na interface do filtro ou movidas para o interior deste, constituindo desta forma uma zona de menor permeabilidade do que na região de fluxo livre anterior ao filtro. Ou seja, a colmatação é provocada pelo depósito de uma camada pouco permeável a montante do filtro e constituída por partículas finas bloqueadas pelo filtro.

Em tubos geotêxteis esta camada é denominada *filter cake* e é responsável por governar o processo de filtração, pois embora a abertura de filtração do geotêxtil possa afetar a perda inicial de finos (GRZELAK *et al.*, 2011), depois de formado, o *filter cake* torna-se um pré-filtro, agindo antes do resíduo atingir o geotêxtil. De forma resumida, ele governa o efeito da filtração e o geotêxtil age como uma camada de suporte (CANTRÉ; SAATHOFF, 2011).

Em se tratando de um lodo ou sedimento contaminado submetido a um desaguamento, não é interessante que haja perda de partículas, mesmo que a retenção gere um aumento das poro-pressões e reduza a velocidade de fluxo, ou seja, aumente o tempo de desaguamento, pois a intenção deste procedimento é conter o material particulado (CASTRO, 2005).

Portanto, a formação da camada de *filter cake* é vista como positiva ao processo de filtração. Entretanto, também é frequente observar na prática que a formação dessa película acaba por impedir o desaguamento, o que gera a necessidade de intervir no processo para que o *filter cake* se descole e o desaguamento volte a ocorrer. Silva (2017) recomenda as seguintes interferências: durante a fase intermediária de desaguamento dos tubos geotêxteis, é recomendável a execução de hidrojateamento, jato de água na face externa dos tubos; aplicação de vibração por meio de equipamento apropriado ou eletrocinética, e que não provoque ruptura no geotêxtil, com o objetivo de provocar o deslocamento da camada de *filter cake* que está reduzindo a permeabilidade do geotêxtil.

Não foi encontrada na literatura metodologia de cálculo específica para filtração de partículas em suspensão em tubos geotêxteis, em que a condutividade

hidráulica do material retido varia em função do modo de deposição das partículas, da posição no tubo e do tempo de desaguamento (CASTRO, 2005). Entretanto, segundo Castro (2005), para partículas em suspensão, a condição ideal seria a apresentada na Equação 8.

$$\frac{K_{GTX}}{T_{GTX}} \times \Delta h \times A \geq Q \quad (8)$$

onde:

- $K_{GTX}$  - condutividade hidráulica do geotêxtil, em cm/s;
- $T_{GTX}$  - espessura do geotêxtil, em cm;
- $\Delta h$  - carga hidráulica, em cm de coluna d'água;
- $A$  - área de filtração em cm<sup>2</sup>;
- $Q$  - vazão de entrada, em cm<sup>3</sup>/s.

As maiores cargas hidráulicas acontecem na base, mas nesta região ocorre rapidamente a deposição de partículas, e então passam a ser considerados os critérios propostos para a filtração de meios porosos. A escolha do geotêxtil mais adequado seria capaz de satisfazer tanto a estes critérios, como a Equação 8.

É importante lembrar que o processo de retenção rapidamente altera a condição inicial em relação à permeabilidade. Nesta fase poderia ser avaliada a condutividade hidráulica em função dos critérios propostos para a filtração de meios porosos, considerando como condutividade hidráulica do solo, a condutividade hidráulica do material obtida a partir de ensaio realizado em corpo-de-prova depositado no permeâmetro em forma de lama e adensado sob peso próprio, por exemplo (CASTRO, 2005).

A filtração em meio poroso é recorrente em problemas de geotecnia, em que devem ser verificados os critérios de retenção, permeabilidade, resistência à colmatação e sobrevivência (CHRISTOPHER; FISCHER, 1992).

Avancini (2017) apresenta as definições a seguir para os critérios de filtração mencionados.

O critério de retenção pode ser resumido como a capacidade que o geotêxtil deve apresentar de reter uma quantidade de partículas suficiente para a formação de um pré-filtro, desenvolvendo uma estrutura estável capaz de prevenir futuras migrações de partículas sólidas.

Este pré-filtro diferencia-se do *filter cake*. Urashima e Vidal (1999) explicam que a ação de um gradiente hidráulico provoca um fluxo que pode carrear algumas partículas através do meio poroso e eventualmente do filtro, o que induz a um rearranjo destas partículas. A adequada interação entre meio poroso, geotêxtil e meio drenante, dependerá das condições de fluxo, sentido do fluxo (único ou reverso) e do gradiente hidráulico. No caso de fluxo em sentido único e meio poroso bem graduado, o geotêxtil não será o único responsável pela filtração, mas sim o elemento que desencadeará a formação de pré-filtro e nesta condição de fluxo, como elemento filtrante, ele reterá as partículas, segundo uma seleção natural; ou seja, as primeiras partículas finas atravessam o geotêxtil no início do processo, porém gradualmente vai ocorrendo a formação do pré-filtro, que acontece devido a dois mecanismos: formação reticulada em arco e formação reticulada em abóboda.

O critério de permeabilidade é baseado no princípio de que o geotêxtil deve possuir permeabilidade superior à do solo a ser retido, uma vez que é esperado que o fluxo não seja impedido ou dificultado pela interface solo/geotêxtil.

O critério de resistência à colmatação busca garantir que o fluxo seja mantido durante toda a vida de serviço do sistema. Esse critério é necessário porque muitas vezes os critérios de retenção e de permeabilidade levam em consideração apenas as maiores aberturas do geossintético e não impõem restrições quanto às aberturas de menor dimensão ou quanto à porosidade mínima.

Por fim, o critério de sobrevivência está relacionado a outros critérios envolvendo o comportamento hidráulico e mecânico do geotêxtil, como por exemplo, relacionados a cargas cíclicas durante os enchimentos, fluência, degradação por intemperismo, sobrevivência à instalação, entre outros, e têm por objetivo determinar algumas propriedades mínimas que devem ser garantidas para que o geotêxtil seja capaz de resistir ao processo de instalação, ciclos de enchimento e drenagem, período de consolidação e por toda vida útil da obra.

Apresentados os critérios de filtração convencionais, entende-se ser de grande importância a discussão sobre a aplicabilidade destes conceitos aos tubos geotêxteis e os cuidados específicos que devem ser tomados para uso como SCRs.

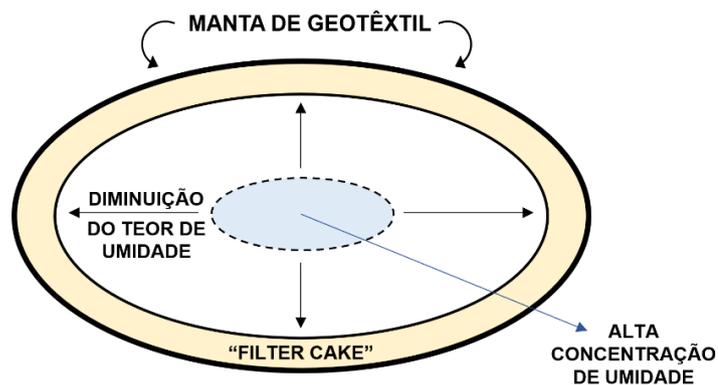
No caso dos sistemas de confinamento de resíduos, como o próprio nome reforça, a intenção do desaguamento é conter o material particulado, sendo a retenção das partículas o critério mais importante. Entretanto, em conjunto, o bom desempenho do sistema muitas vezes exige alta taxa no fluxo de desaguamento e

consequentemente, maior permeabilidade do geotêxtil. Essas condições podem ser contraditórias, devendo o projetista buscar o equilíbrio entre esses critérios, priorizando as necessidades de cada projeto (AVANCINI, 2017).

A eficiência de filtração e a eficiência de desaguamento do sistema são ferramentas importantes para avaliar a retenção e a permeabilidade e podem ser calculadas a partir de resultados obtidos experimentalmente. Nesse contexto, os ensaios apresentados nos itens 2.3.2 e 2.3.3, podem trazer boas contribuições.

Para além do desempenho hidráulico, entrando na fase de consolidação, a dificuldade da passagem do fluido que está no interior do tubo através do geotêxtil induz zonas com maior teor de umidade no interior do tubo geotêxtil, sendo as extremidades mais secas, como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Distribuição da umidade e formação do “Filter Cake”.



Fonte: Adaptado de Gaffney *et al.* (1999).

## 2.6 PROPRIEDADES RELEVANTES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS GEOTÊXTEIS

Para a utilização de tubos geotêxteis como solução de engenharia, é importante que sejam avaliados os padrões de modo de falha e deformações aos quais estarão submetidos (SILVA, 2017).

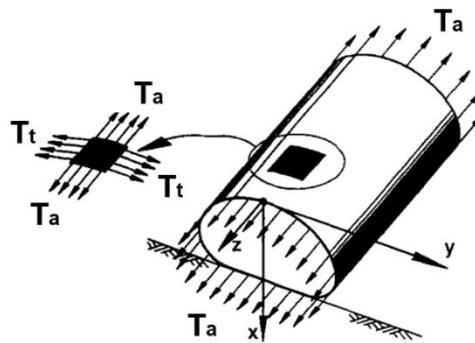
Os estados limites de solitação podem ser divididos em externos, aqueles que afetam o desempenho da estrutura global, e internos, aqueles que afetam o desempenho da estrutura do geotêxtil (LAWSON, 2008).

O foco deste trabalho consiste em avaliar o desempenho da estrutura do geotêxtil, portanto, o estudo será voltado para os métodos de análise de solitações internas.

Estes métodos se baseiam em dois principais fatores: a tensão solicitante e a forma do tubo geotêxtil.

O preenchimento de um tubo com lodo, lama ou fluido pressurizado solicita o geotêxtil como um invólucro encapsulante. A Figura 18 apresenta as duas principais tensões geradas: tração circunferencial e axial.

Figura 18 – Esforços solicitantes em um tubo com fluido pressurizado.



Fonte: Leshchinsky *et al.* (1996).

A maioria dos métodos de dimensionamento de tubos geotêxteis foi desenvolvida considerando que o material é modelado como uma membrana inextensível com peso desprezível. Esses métodos são baseados principalmente em duas abordagens: a teoria de membrana e o método dos elementos finitos (LAWSON, 2008). Dentre os métodos clássicos de dimensionamento estão os desenvolvidos por Carroll (1994); Kazimierowicz (1994); Leschinsky *et al.* (1996); Liu (1981); Plaut e Suherman (1998); com base na teoria de membrana, que resultam na resistência à tração circunferencial e na geometria do sistema. Já para o método dos elementos finitos, trabalhos como Seay (1998); Huong (2001); Cantré (2002) e Silva (2019) foram desenvolvidos. Segundo Brink (2014), a modelagem numérica auxilia, com precisão, na previsão do comportamento do tubo geossintético em termos de projeto, sendo uma ferramenta importante no dimensionamento de estruturas.

Os resultados obtidos com os métodos de teoria da membrana são consistentes com os encontrados para geotêxteis tecidos de alta resistência (KIM *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2021), pois estes possuem baixa deformação na ruptura, de acordo com a hipótese da membrana inextensível. Cantré e Saathoff (2011) também explicam que o dimensionamento de tubos geotêxteis feitos de material tecido de alta resistência com baixo alongamento na ruptura se correlaciona bem com as teorias de membrana existentes e métodos de dimensionamento. No entanto, esses autores

chamam a atenção para o fato de que o mesmo não pode ser considerado com geotêxteis não tecidos com alto alongamento à ruptura, pois não correspondem muito bem aos resultados calculados para a geometria da seção transversal e tensões elásticas.

O dimensionamento de tubos geotêxteis considerando geotêxteis com diferentes características tem sido pouco explorado, pois a utilização de geotêxteis tecidos de alta resistência como material do tubo é uma solução consolidada no mercado. Um exemplo disso é a norma técnica NTS 301 (2015) da Sabesp (empresa brasileira de gerenciamento de resíduos do estado de São Paulo) que especifica o geotêxtil tecido para tubos geotêxteis aplicados em ETE e ETA.

Para analisar tensões transversais em tubos geotêxteis, entre as hipóteses iniciais das metodologias está que o tubo deve ser longo o suficiente para que o estado plano de deformação possa ser estabelecido e representativo do comportamento do tubo. Apesar dessa premissa, poucos métodos estabelecem um critério quantitativo. O método proposto por Cantré e Saathoff (2011) recomenda que o comprimento axial do tubo seja 2,5 vezes maior que o perímetro da seção transversal. A modelagem numérica de Silva *et al.* (2021), por exemplo, que será discutida a seguir, considera um tubo com comprimento de 6 m e perímetro de 4,3 m (razão de 1,4) longo o suficiente para atingir o estado de deformação plana. Ao comparar os resultados da modelagem numérica com os resultados do método analítico proposto por Guo *et al.* (2014) com base na teoria de membrana, os autores descobriram que ambos os métodos foram capazes de representar o comportamento do tubo geotêxtil durante o processo de enchimento. Assim, entende-se que é viável, para fins de análise, considerar a premissa de estabelecimento do estado plano de deformação, mesmo em tubos que não atendam ao critério geométrico de 2,5 recomendado por Cantré e Saathoff (2011).

## 2.7 MÉTODOS PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE TUBOS GEOTÊXTEIS

Guo (2012) desenvolveu, em laboratório, testes em tubos geossintéticos impermeáveis constituídos de PVC com 0,6 mm de espessura. As dimensões dos tubos corresponderam a 1,0; 1,5 e 2,0 m de largura e 2,0; 3,0 e 4,0 m de comprimento. A estrutura foi instrumentada e monitorada por sensores de deslocamento, extensômetros, piezômetros e laser, o que possibilitou a realização de medições

relacionadas à geometria e às tensões geradas durante o enchimento do tubo geossintético.

Os ensaios desenvolvidos por Guo (2012) foram os únicos encontrados em literatura para tubos de grandes dimensões e com instrumentação completa, o que os tornou internacionalmente reconhecidos por permitirem realizar correlações diretas entre os parâmetros obtidos nos ensaios físicos e os resultados obtidos por métodos teóricos.

Silva (2019), que utilizou o trabalho de Guo (2012) para validação de sua modelagem, discute a importância de trabalhos futuros realizarem estudos de campo com projeto de instrumentação preciso, incluindo o uso de extensômetros para medidas de deformação e posterior obtenção de tensões geradas durante o processo de enchimento.

A escassez deste tipo de monitoramento em escala de verdadeira grandeza e com diferentes materiais para tubos geossintéticos, permitindo determinar as propriedades particulares de cada um, foi a grande motivação deste trabalho, que buscou monitorar em campo o comportamento de tubos fabricados a partir de geotêxtil não tecido. Com o objetivo de avaliar diferentes metodologias de dimensionamento em relação aos dados coletados em campo, foram escolhidos para análise comparativa neste trabalho dois métodos analíticos baseados na teoria de membrana considerando o geotêxtil inextensível, sendo estes o de Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014). Também foi escolhida a metodologia de Cantré e Saathoff (2011), que considera as deformações do geotêxtil no dimensionamento. Por fim, para análise da modelagem numérica, foi selecionado o trabalho de Silva (2019), baseado no método dos elementos finitos.

O método de Plaut e Suherman (1998) é reconhecido mundialmente, tendo sido desenvolvido pelo fabricante de tubos TenCate, marca respeitada no mercado, aplicado através do software GeoTube Simulator.

A abordagem de Guo *et al.* (2014), por sua vez, é o método analítico mais atual para a determinação da forma e tensões geradas em tubos geossintéticos. Embora não seja afirmado claramente pelos autores, a metodologia parece ter sido desenvolvida para valores de peso específico do material de preenchimento entre 10 kN/m<sup>3</sup> e 14 kN/m<sup>3</sup> e perímetros da seção transversal entre 5 e 20 m (PALMEIRA, 2018). Estes dados são condizentes com os tubos geotêxteis monitorados em campo no presente estudo e por esse motivo acredita-se ser adequado para comparação dos

dados. Apesar de estar relacionado a tubos geossintéticos impermeáveis, a solução pode ser aplicada a tubos geossintéticos permeáveis Guo (2012).

No método Cantré e Saathoff (2011), os autores incluíram o comportamento elástico não linear de geotêxteis não tecidos no método proposto por Plaut e Suherman (1998).

Silva (2019), em sua dissertação de mestrado, analisa cuidadosamente as hipóteses utilizadas por diversos autores para a realização de modelagem numérica e em seguida, utiliza como dados de entrada para sua própria modelagem o trabalho desenvolvido por Silva (2017) com tubos geotêxteis tecidos em mineração de ouro. São apresentadas, entre outras, análises de forma, pressão de bombeamento e solicitação à tração. Esse tipo de abordagem tem especial interesse neste trabalho, que também busca analisar dados coletados em campo, mesmo que em outro tipo de aplicação. A publicação mais recente referente a dissertação de Silva (2019) se refere ao artigo de Silva *et al.* (2021). Como muitas das discussões realizadas pelo autor que foram utilizadas neste trabalho estão na dissertação, optou-se por referenciar diretamente Silva (2019).

Na sequência são apresentados os processos de cálculo das metodologias de Plaut e Suherman (1998), Guo *et al.* (2014), Cantré e Saathoff (2011) e também, os resultados e análises de Silva (2019).

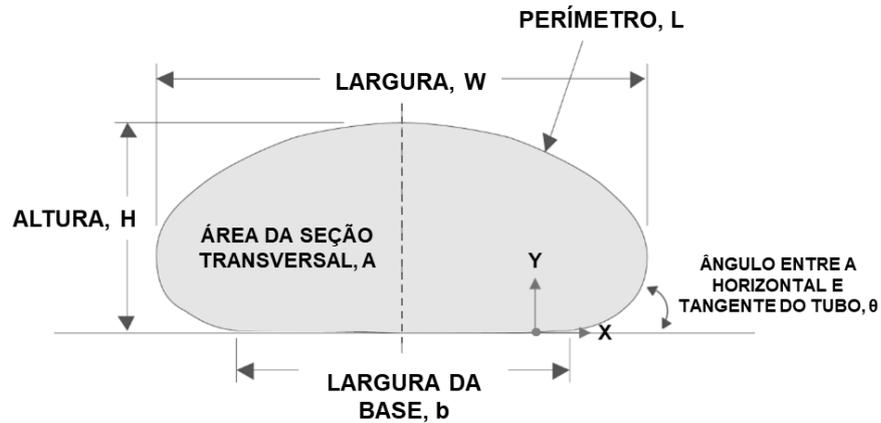
### **2.7.1 Plaut e Suherman (1998)**

As seguintes premissas são assumidas pelos autores para desenvolvimento de sua metodologia:

- o geossintético é inextensível e de peso desprezível;
- o tubo geossintético está submetido a uma pressão hidrostática interna e apoiado em uma fundação rígida;
- o tubo é longo o suficiente, para que a análise seja bidimensional.

A Figura 19 traz a apresentação dos parâmetros geométricos utilizados, bem como a localização do ponto 0 das coordenadas  $x$  e  $y$ .

Figura 19 – Parâmetros geométricos utilizados na metodologia de Plaut e Suherman (1998).

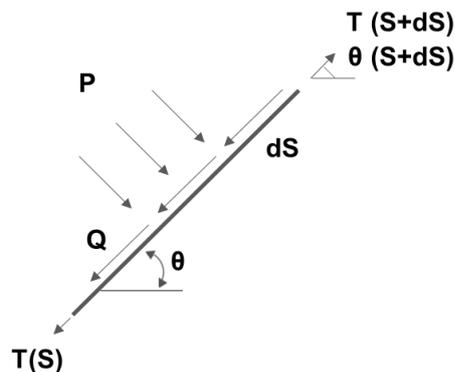


Fonte: adaptado de Plaut e Suherman (1998).

O ponto de partida da análise é a definição de um elemento infinitesimal, de  $S$  a  $S+dS$  (Figura 20) localizado entre o ponto de início das coordenadas,  $0$ , e  $L-b$  ( $0 < S < L-b$ ), ou seja,  $S$  é o arco da elipse.

A Figura 20 também apresenta as nomenclaturas utilizadas para pressão hidrostática interna ao tubo geotêxtil ( $P$ ), força tangencial por área ( $Q$ ) e a tensão circunferencial por largura perpendicular à seção transversal ( $T$ ).

Figura 20 – Elemento infinitesimal, de  $S$  a  $S+dS$ .



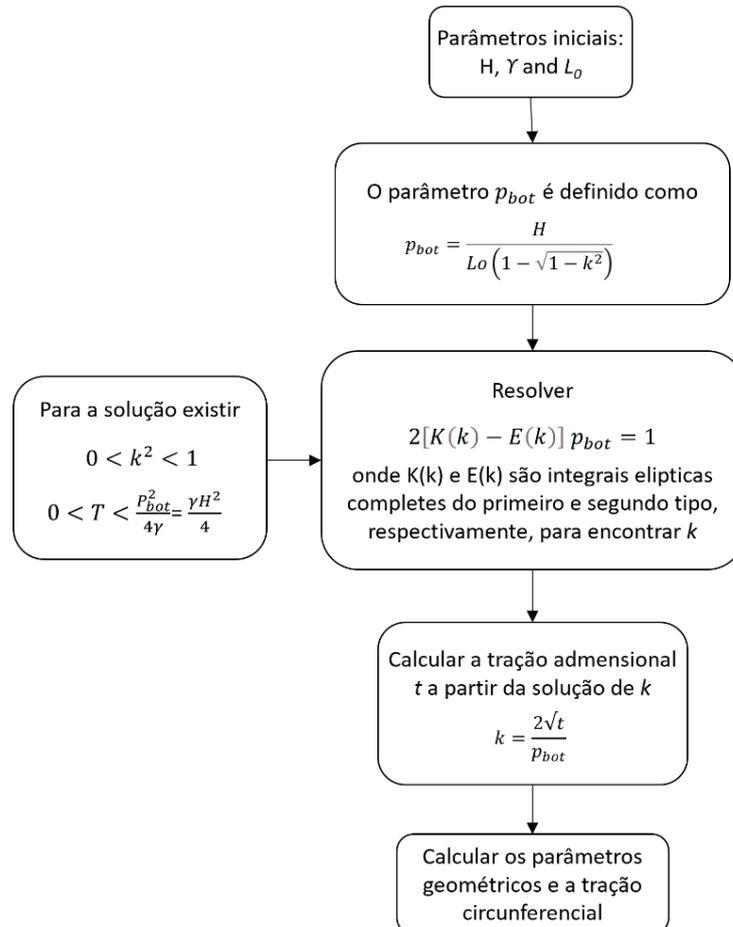
Fonte: adaptado de Plaut e Suherman (1998).

Plaut e Suherman (1998) basearam-se na resolução de integrais elípticas, que são uma ferramenta matemática criada para solucionar problemas de comprimento de arco, como base de sua metodologia.

O processo de cálculo pode ser encontrado no fluxograma apresentado na Figura 21. Os cálculos são iterativos e a solução é encontrada ao se obter a

convergência para os parâmetros geométricos, que determinam a forma do tubo, e a tensão circunferencial.

Figura 21 – Etapas de cálculo do método de Plaut e Suherman (1998)



Fonte: adaptado de Plaut e Suherman (1998).

### 2.7.2 Guo *et al.* (2014)

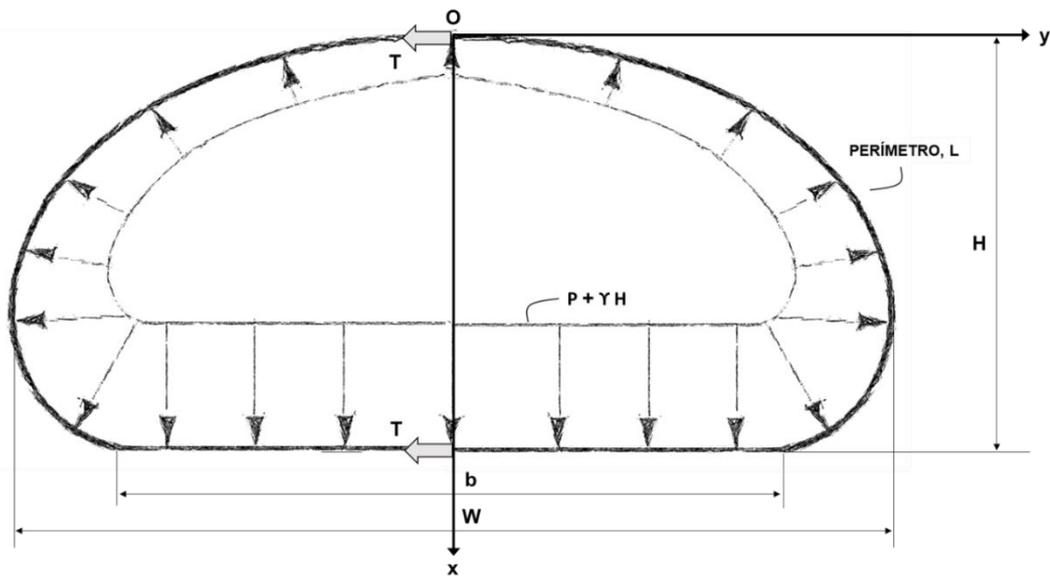
Guo *et al.* (2014) utilizaram as seguintes premissas para o desenvolvimento de sua solução analítica:

- o problema é considerado bidimensional, ou seja, com estado plano de deformações: o tubo é longo o suficiente para que todas as seções transversais perpendiculares ao eixo axial sejam idênticas em termos de geometria e materiais;
- o invólucro geossintético é fino, flexível e tem peso desprezível por unidade de comprimento;

- o atrito entre o material de enchimento e o geossintético e entre o geossintético e a fundação são desprezados;
- a tensão circunferencial,  $T$ , ao longo do geossintético é constante;
- é considerado um único material de enchimento para o tubo geossintético com peso específico  $\gamma$ ;
- não há esforços externos atuando no tubo.

A Figura 22 traz a apresentação dos parâmetros geométricos utilizados (mesmas nomenclaturas utilizadas na Figura 20 para o método de Plaut e Suherman (1998), a localização do ponto 0 das coordenadas  $x$  e  $y$  e indica a pressão atuando internamente no tubo ( $P + \gamma H$ ), onde  $P$  é a pressão de enchimento e  $H$  a altura do tubo.

Figura 22 – Parâmetros utilizados na metodologia de Guo *et al.* (2014).



Fonte: adaptado de Guo *et al.* (2014).

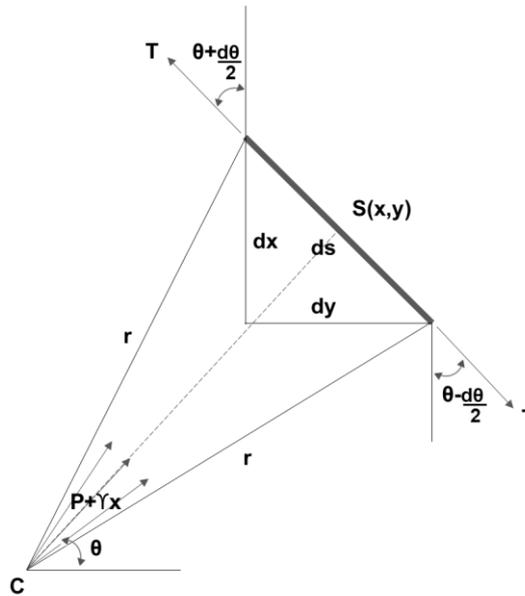
Uma curva infinitesimal de comprimento  $ds$  no ponto  $S(x,y)$  pode ser tratada como um arco com o centro no ponto aleatório  $C$  e raio  $r$ , conforme é mostrado no diagrama de corpo livre da Figura 23.

Ao se realizar o equilíbrio de forças atuando na direção horizontal, envolvendo pressão e tração circunferencial,  $T$ , indicadas na Figura 22, obtém-se as Equações 9 e 10:

$$T = \frac{\left(P H + \frac{1}{2} \gamma H^2\right)}{2} \quad (9)$$

$$T - T \sin \theta = \int_0^S (P + \gamma x) ds \sin \theta = \int_0^S (P + \gamma x) dx = Px + \frac{1}{2} \gamma x^2 \quad (10)$$

Figura 23 – Diagrama de corpo livre para curva infinitesimal.



Fonte: Adaptado de Guo *et al.* (2014).

A forma do tubo pode ser determinada utilizando as Equações 11 e 12, resolvidas computacionalmente ou por outro meio capaz de realizar os cálculos. As variáveis  $x$  e  $y$  determinam nas equações as coordenadas dos pontos que formam a seção transversal do tubo geotêxtil.

$$x = \frac{1}{\gamma} [-P^2 + 2\gamma T (1 - \sin \theta)] \quad (11)$$

$$y = -\sqrt{\frac{T}{2\gamma}} \int \left( \sqrt{N - \sin \theta} - \frac{N}{\sqrt{N - \sin \theta}} \right) d\theta \quad (12)$$

onde  $N$  é o fator de pressão de enchimento dado pela Equação 13:

$$N = 1 + \frac{P^2}{2\gamma T} \quad (13)$$

Por geometria tem-se a Equação 14:

$$\sin \theta = 1 - \left( Px + \frac{1}{2} \gamma x^2 \right) / T \quad (14)$$

Caso o perímetro do tubo geotêxtil seja tomado como dado de entrada, a altura pode ser definida com uma iteração, assumindo-se a Equação 15:

$$H_t = \frac{L}{\pi} \quad (15)$$

onde  $H_t$  é altura teste, como parâmetro de entrada para calcular o perímetro teste,  $L_t$ . Se  $L_t$  é diferente de  $L$ , então, é preciso modificar o valor de  $H_t$  e repetir o processo de cálculo até que a diferença entre  $L_t$  e  $L$  seja inferior a  $10^{-6}$  (GUO *et al.*, 2014).

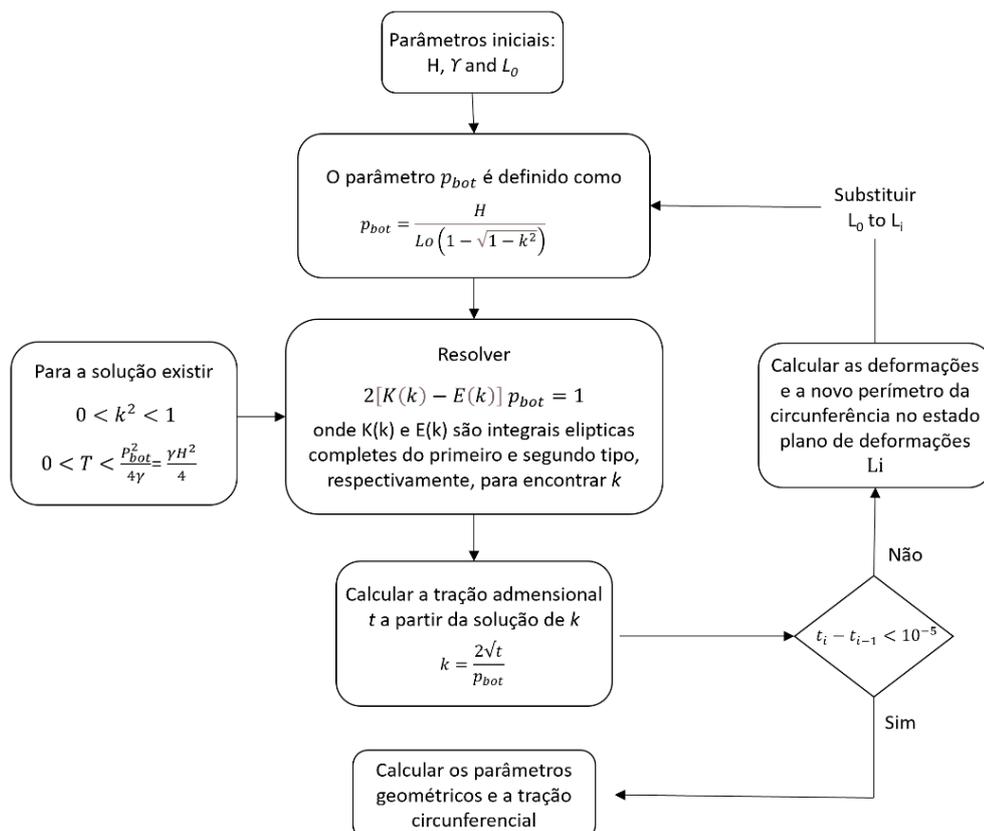
### 2.7.3 Cantré e Saathoff (2011)

Os autores incluíram o comportamento elástico não linear de geotêxteis não tecidos no método proposto por Plaut e Suherman (1998). Este procedimento foi feito adicionando uma etapa de cálculo ao método iterativo. A cada nova iteração, o perímetro anteriormente constante aumentava de comprimento devido à deformação. Em seguida, um novo equilíbrio foi estabelecido e a tensão circunferencial foi recalculada. O incremento da tensão adimensional entre duas iterações foi usado como critério de parada. O fluxograma da Figura 24 apresenta o procedimento de cálculo.

Cantré e Saathoff (2011) consideraram o módulo de elasticidade para o material da casca encapsulante. ASTM D4595 (ASTM, 2017) apresenta o procedimento para determinar o módulo de elasticidade da curva tensão-deformação do teste. Essa norma também estabelece um ponto denominado “limite proporcional” como o ponto de maior tensão que um material pode suportar sem nenhum desvio da proporcionalidade tensão-deformação (lei de Hooke). Em uma curva tensão-deformação típica (Figura 25), geralmente existem três regiões (ASTM, 2017):

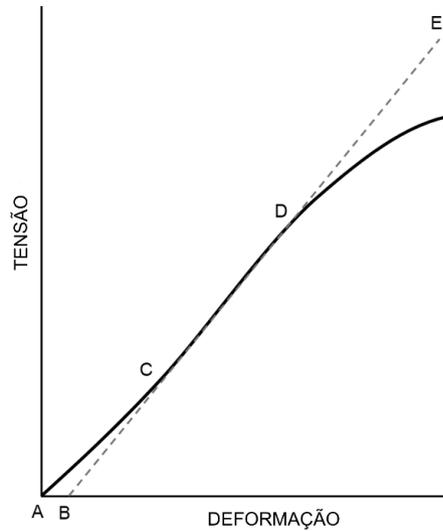
- uma região de convergência (AC) que representa a redução da folga, alinhamento ou assentamento do espécime; também pode representar uma parte significativa da característica de alongamento do corpo de prova. Esta região é considerada na determinação do módulo inicial ( $J_{in}$ ) do geotêxtil.
- uma região linear (BD), no caso de um geotêxtil exibindo uma região de comportamento Hookean (linear). Uma continuação da região linear da curva é construída através do eixo de força zero. Essa interseção, ponto B, é o ponto de alongamento zero a partir do qual o alongamento é medido. Quaisquer dois pontos na linha BE podem oferecer o módulo de elasticidade ( $J$ ).
- a região com deformações acima do limite proporcional, após o ponto tangente (D), é o primeiro ponto da curva de alongamento da força em que ocorre uma grande diminuição da inclinação. A partir deste ponto, um módulo secante ( $J_{sec}$ ) é estabelecido para cada trecho de deformação.

Figura 24 – Etapas de cálculo da proposta de Cantre e Saathoff (2011) inseridas no método de Plaut e Suherman (1998).



Fonte: adaptado de Cantre e Saathoff (2011).

Figura 25 – Curva tensão-deformação típica para geotêxteis com comportamento linear. A a E representam pontos específicos nesta curva.



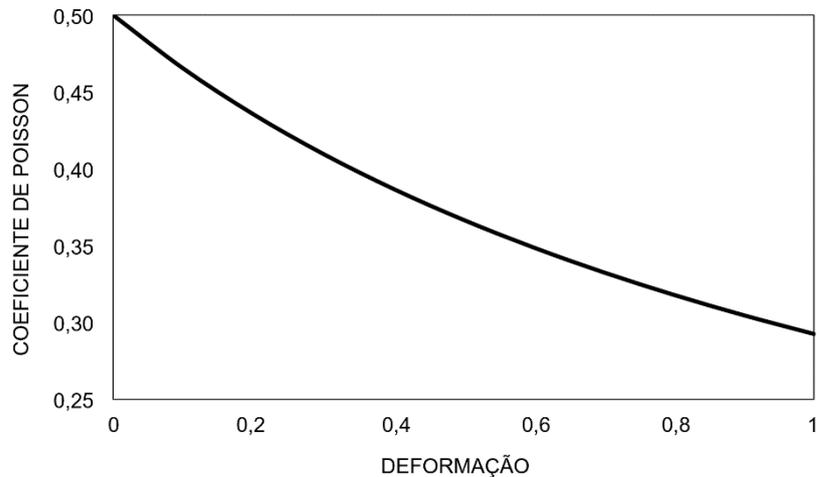
Fonte: adaptado de Cantre e Saathoff (2011).

É importante ressaltar que a norma utilizada para realizar os ensaios de tração neste trabalho foi a ABNT NBR ISO 10319 (ABNT, 2013b), que é equivalente a ASTM D 4595 (ASTM, 2017), com diferença na taxa de deformação ( $10 \pm 3\%/min$  para a ASTM D 4595 e  $20 \pm 5\%/min$  para ABNT NBR ISO 10319). Portanto, as mesmas regiões podem ser encontradas nas curvas obtidas por as duas referências normativas.

Além do módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) é um parâmetro importante para o cálculo da deformação aparente. De acordo com Giroud (2004), materiais incompressíveis, como geomembranas não reforçadas, têm um  $\nu$  de 0,5. Por outro lado, os geotêxteis não tecidos têm um  $\nu$  menor que 0,5 para pequenas deformações. O mesmo autor observou que o  $\nu$  de um material diminui à medida que a deformação aumenta. Giroud (2004) apresenta o gráfico da Figura 26, em que o  $\nu$  de um material diminui à medida que a deformação aumenta.

Assumindo que o coeficiente de Poisson inicial ( $\nu_0$ ) é 0,5 para geotêxteis não tecidos, espera-se que  $0,4 < \nu < 0,5$  satisfaça as deformações desenvolvidas no ensaio de campo e, conseqüentemente, na análise teórica pelo método proposto por Cantre e Saathoff (2011).

Figura 26 – Curva para razão de Poisson inicial ( $\nu$ ) igual a 0,5: os valores diminuem quando as deformações aumentam.



Fonte: adaptado de Cantre e Saathoff (2011).

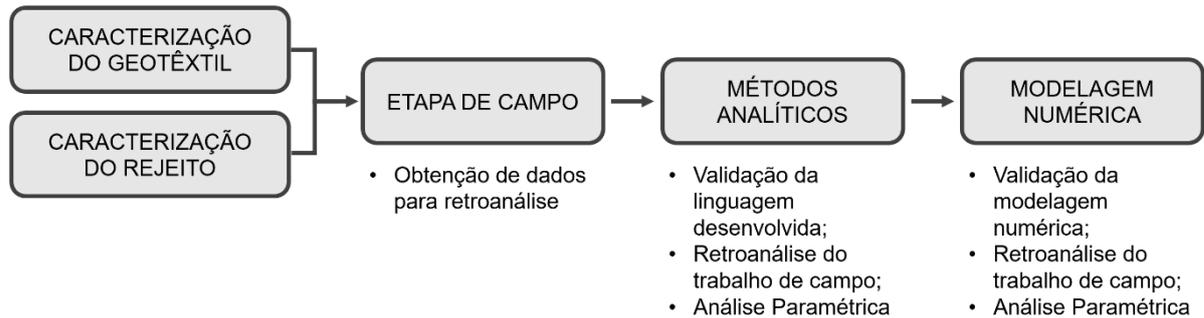
#### 2.7.4 Silva (2019)

Silva (2019) realizou seu estudo com base nos resultados obtidos no estudo de campo realizado por Silva (2017). Para tanto, obteve-se os parâmetros do geotêxtil, que foi utilizado para fabricação do tubo, sendo um geotêxtil tecido fabricado com fios de polipropileno de alta resistência, bem como os parâmetros do rejeito que se usou para disposição hidráulica, sendo este rejeito de mineração de ouro.

A partir dos dados levantados, primeiramente, adotaram-se métodos analíticos para a realização da retroanálise de campo. Posteriormente, o mesmo foi feito para a modelagem numérica por meio do software de elementos finitos Abaqus versão 6.14 (DASSAULT SYSTEMES, 2014). A Figura 27 apresenta fluxograma da metodologia adotada.

Os métodos analíticos utilizados foram Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014), apresentados nos tópicos anteriores, tendo o autor desenvolvido um algoritmo numérico para aplicação de cada método selecionado. Com o auxílio do programa NotePAD++ e utilizando linguagens de programação Java e HTML, foram desenvolvidos códigos de programação que permitem inserir três parâmetros iniciais (perímetro do tubo, peso específico do material de enchimento e um adimensional referente à pressão de enchimento), e obter como resultados a forma do tubo geotêxtil e a tensão circunferencial.

Figura 27 – Fluxograma da metodologia de pesquisa.



Fonte: Adaptado de Silva (2017).

A validação dos códigos de programação foi realizada comparando os resultados de vários estudos existentes na literatura (GUO, 2012; KAZIMIEROWICZ, 1994; LESHCHINSKY *et al.*, 1996; LIU, 1981; SILVESTER, 1986), utilizando diferentes parâmetros de entrada (pressão interna, peso específico e perímetro) com os resultados obtidos. O autor concluiu que o algoritmo numérico desenvolvido levava a uma correta geometria associada e a uma correta tensão circunferencial (com uma pequena e aceitável margem de erro devido às aproximações). A Tabela 2 mostra um exemplo de validação realizada.

Silva (2017) avaliou o desaguamento de rejeitos de ouro a partir de tubos geotêxteis tecidos instalados na Mineração Fazenda Brasileiro - Bahia, com dimensões de aproximadas de 2,15 m de largura, diâmetro de 4,3 m e 6,0 m de comprimento, empilhados em formato de pirâmide 9:4:1 a partir da base da estrutura.

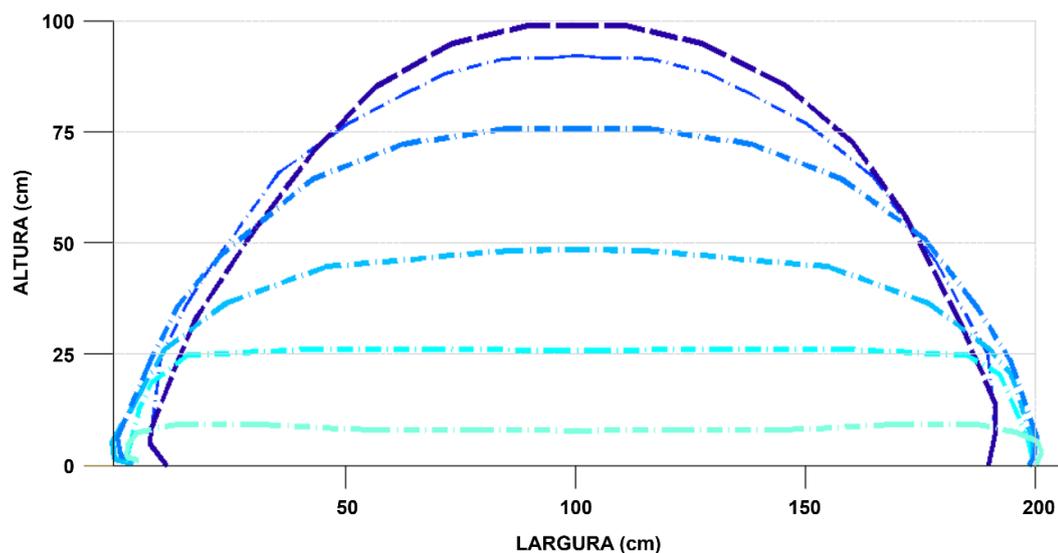
A partir dos dados obtidos por meio de mira laser, régua em pórtico e da sobreposição de imagens durante o processo de bombeamento, foi possível realizar o estudo da evolução da forma do tubo. A Figura 28 apresenta a variação da forma, altura e largura ao longo das etapas de enchimento de um dos tubos localizado na parte inferior do empilhamento, que foi o foco dos estudos de Silva (2019).

Tabela 2 – Valores calculados para peso específico do material igual a  $\gamma=20\text{kN/m}^3$ .

Parâmetro de entrada			Parâmetros de saída				
Perímetro (m)	Pressão interna (kPa)	Referência	H (m)	b (m)	W (m)	Área (m <sup>2</sup> )	T (kN/m)
3,6	44,6	Silvester (1986)	1,00	0,48	1,27	1,05	17,50
3,6	44,6	Leshchinsky <i>et al.</i> , (1996)	1,00	0,46	1,27	1,04	17,40
3,6	44,6	Algoritmo para Plaut e Suherman (1998)	0,98	0,44	1,27	1,00	17,49
3,6	44,6	Algoritmo para (GUO <i>et al.</i> , 2014)	0,98	0,44	1,24	1,00	17,10
3,6	18,1	Silvester (1986)	0,70	0,94	1,45	0,89	4,20
3,6	18,1	Leshchinsky <i>et al.</i> , (1996)	0,75	0,95	1,42	0,90	4,20
3,6	18,1	Algoritmo para Plaut e Suherman (1998)	0,74	0,93	1,40	0,87	4,19
3,6	18,1	Algoritmo para (GUO <i>et al.</i> , 2014)	0,75	0,90	1,39	0,88	4,53

Fonte: Silva (2019).

Figura 28 – Variação da forma do tubo durante o enchimento.



Fonte: Adaptado de Silva (2017).

Para a retroanálise, aplicando-se os métodos analíticos, fixou-se o perímetro do tubo geossintético em 4,3 m e o peso específico do material 14,22 kN/m<sup>3</sup>. A partir de então, a pressão interna foi sendo ajustada até que fosse encontrada a geometria da seção transversal coletada no estudo de campo para o enchimento máximo, sendo 1,00 m de altura e largura de 1,67 m. Obteve-se assim, a pressão atuante em campo no momento da disposição hidráulica.

Primeiramente, foi considerado como pressão interna a pressão hidrostática do rejeito bombeado, sendo calculada a partir do peso específico do rejeito bombeado e altura final do tubo após bombeamento:

$$\text{Pressão} = \gamma \times H = 14,22 \text{ kN/m}^3 \times 1,00 \text{ m} = 14,22 \text{ kPa}$$

A forma final da seção transversal do tubo geotêxtil, depois da aplicação da pressão hidrostática, atingiu altura aproximada de 0,80 m, denominada seção de referência. Isto significa que somente a pressão hidrostática, devido ao peso próprio do material (14,22 kPa), não é suficiente para alcançar a altura de 1,00. Dessa maneira, acredita-se que, em campo, estava sendo aplicada uma pressão interna no tubo, além da pressão hidrostática.

Quando o tubo geotêxtil é preenchido com rejeito sob pressão hidrostática, devido ao peso próprio do material, é necessária uma pressão extra, para que uma maior altura seja alcançada. A diferença entre a pressão hidrostática e o excesso de pressão interna no tubo é a pressão de bombeamento, segundo Guo (2012). A Figura 29 apresenta os estágios de enchimento e respectivas pressões.

Figura 29 – Esquema de aplicação de pressões. Estágio 1: início do bombeamento; Estágio 2: tubo na seção de referência; Estágio 3: tubo com pressão de bombeamento.



Fonte: Modificado de Guo (2012).

A Tabela 3 apresenta os resultados das retroanálises realizadas pelas codificações das metodologias analíticas de Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014). Para ambos os casos, o excesso de pressão interna, além da pressão hidrostática, necessária para alcançar uma altura de 1,00 m foi de aproximadamente 7 kPa, totalizando em uma pressão total de 21 kPa.

Tabela 3 – Resultados das retroanálises realizadas pelas codificações das metodologias analíticas de Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014) comparadas aos dados coletados em campo.

Parâmetro de entrada			Parâmetros de saída				
Perímetro (m)	Pressão interna (kPa)	Referência	H (m)	b (m)	W (m)	Área (m <sup>2</sup> )	T (kN/m)
4,3	21	Algoritmo para Plaut e Suherman (1998)	1,00	0,89	1,60	1,34	7,32
4,3	21	Algoritmo para (GUO <i>et al.</i> , 2014)	1,00	0,90	1,60	1,33	7,18
4,3	-	Dados coletados por Silva (2017)	0,99	-	1,67	-	-

Fonte: Silva (2017).

O desenvolvimento do modelo de elementos finitos foi realizado por meio da utilização do software Abaqus 6.14 (DASSAULT SYSTEMES, 2014).

O autor descreve em sua metodologia as fases de cálculo e resultados que auxiliaram na definição do modelo, incluindo a discretização da malha, modelagem da interface entre as estruturas, condições de contorno, aspectos do carregamento e modelos constitutivos, que descrevem a relação entre a tensão e deformação dos materiais.

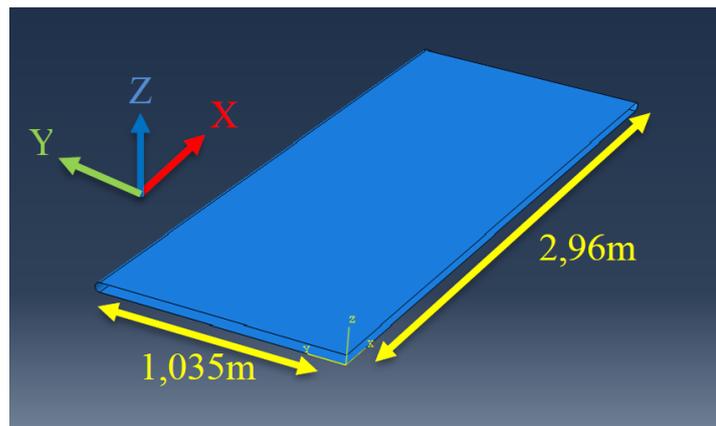
De forma resumida, a análise realizada foi do tipo não linear, que considerou grandes deformações e deslocamentos, não linearidade do material, não linearidade das condições de contorno e não linearidade no contato dos elementos. Visto que o tubo geotêxtil varia bastante em relação à sua forma inicial, esse tipo de análise é a mais adequada para implementar no modelo estudado.

Nesse tipo de análise, a cada incremento de carregamento, o equilíbrio das equações é realizado com base na configuração atual do modelo, ou seja, não se considera a condição original do problema. Dessa maneira, o modelo é atualizado a cada incremento de carregamento realizado, sendo condizente com o processo de enchimento do tubo.

Para simplificar o modelo devido ao longo tempo de processamento da modelagem numérica do tubo completo (aproximadamente 24 horas), o autor optou pela modelagem de apenas um quarto do tubo geotêxtil. Dessa forma, conforme apresentado na Figura 30, as dimensões utilizadas foram 1,035 m de largura por 2,96 m de comprimento. Esta simplificação foi adotada após a realização de simulação com o tubo completo, com metade do tubo e com um quarto, sendo verificada a convergência dos resultados, sem prejuízo da adoção da simplificação.

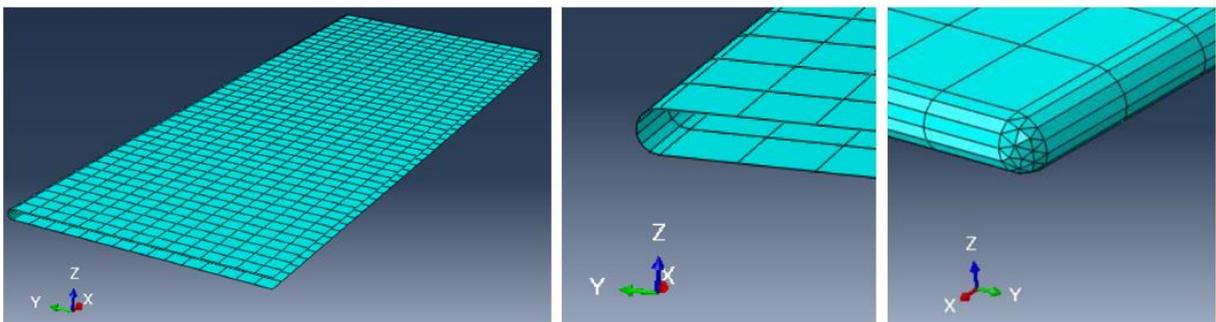
O autor selecionou dois tipos de elementos disponíveis no software Abaqus: casca e membrana. A diferença principal entre os dois elementos é a rotação existente nos nós da malha. Enquanto o elemento de casca permite a rotação, o de membrana não possui esse grau de liberdade, ou seja, não tem rigidez à flexão. A geometria dos elementos de malha foi adotada conforme mostra Figura 31.

Figura 30 – Dimensões do modelo adotado com um quarto da geometria completa.



Fonte: Silva (2019).

Figura 31 – Geometria dos elementos de malha.



Fonte: Adaptado de Silva (2019).

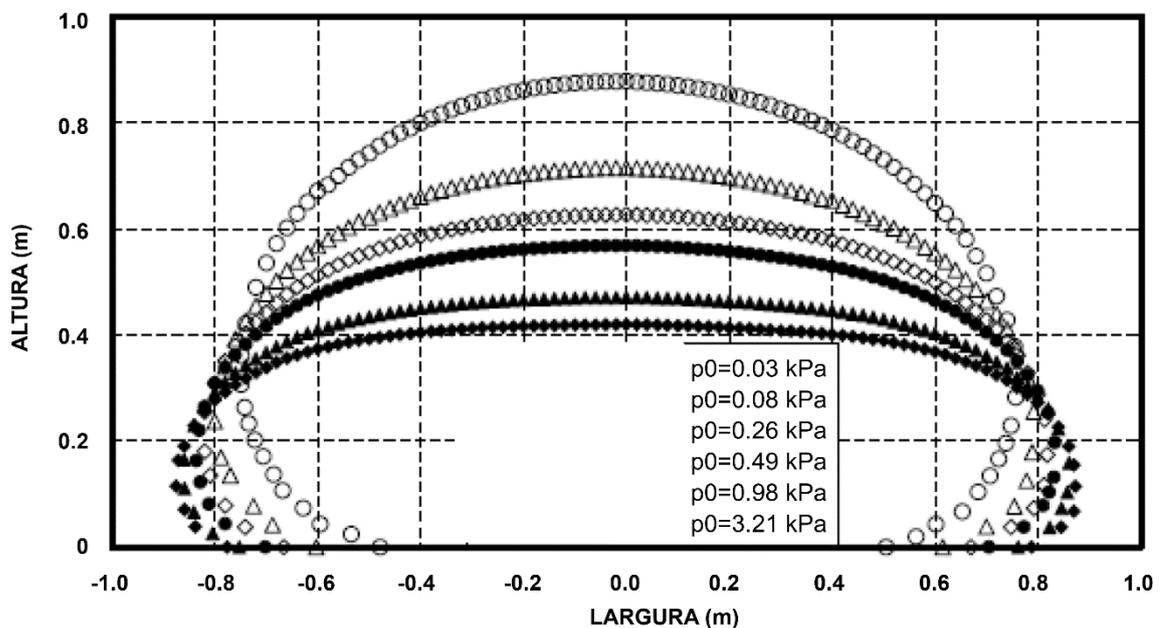
Em relação a discretização da malha, foi adotada em 0,07 m, tendo sido escolhida após testes de convergência, sendo a maior abertura que não apresentou problemas para modelagem. A fundação, considerada rígida e sem deslocamentos ou deformações, foi construída com uma malha grosseira com divisões de 0,5 m.

A aplicação do carregamento foi realizada seguindo as premissas dos modelos analíticos e o encontrado em campo, sendo uma pressão hidrostática aplicada internamente ao tubo geotêxtil, visando modelar o bombeamento de rejeitos, como fluido com alto teor de umidade (baixo teor de sólidos). Esta variável está ligada ao peso específico do rejeito, que é igual a  $1,45 \text{ g/cm}^3$ .

Em uma primeira etapa da modelagem numérica, o autor faz a validação das premissas de seu modelo tomando como base o trabalho de Guo (2012), que desenvolveu, em laboratório, testes em tubos geossintéticos impermeáveis constituídos de PVC, utilizando especificamente os dados coletados para o tubo com dimensões de 2,0 m de largura e 4,0 m de comprimento.

Guo (2012) instrumentou e monitorou o tubo geossintético com sensores de deslocamento, extensômetros, piezômetros e laser, o que possibilitou realizar todas as medições relacionadas à geometria e às tensões geradas durante o enchimento. A Figura 32 apresenta a evolução da seção transversal com o aumento da pressão de bombeamento ( $p_0$ ). Como resumo dos resultados, a maior altura alcançada foi de 0,87 m, com um excesso de pressão interna de 3,21 kPa, resultando em uma pressão total de 11,50 kPa.

Figura 32 – Evolução da seção transversal com o aumento da pressão de bombeamento ( $p_0$ ).



Os valores de tensões coletados através dos extensômetros, ficaram instáveis para esse experimento e um pouco abaixo do encontrado pelos métodos analíticos (3,35 kN/m), como mostra a Figura 33. Assim, para validação do modelo, Silva (2019) buscou comparar o resultado da modelagem numérica com a tensão obtida no método analítico.

Para avaliar as tensões circunferenciais no tubo na modelagem numérica, foram determinados pontos de referência, conforme apresentado na Figura 34. O elemento  $Z_i$  representa o ponto mais alto da seção e o elemento  $Z_f$  representa o ponto mais baixo da seção. A avaliação foi feita partindo do ponto inicial  $Z_i$ , percorrendo toda a seção, passando pelos pontos  $Z_c$  até o ponto final  $Z_f$ .

Figura 33 – Comparação da tensão circunferencial (experimento de laboratório com método analítico).

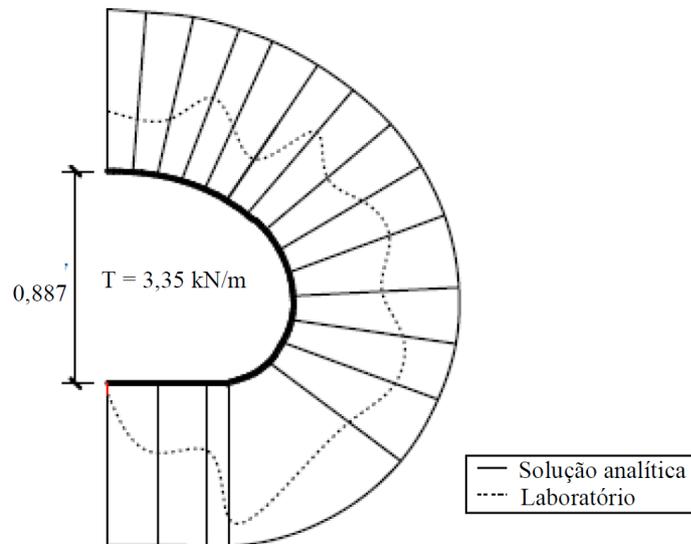
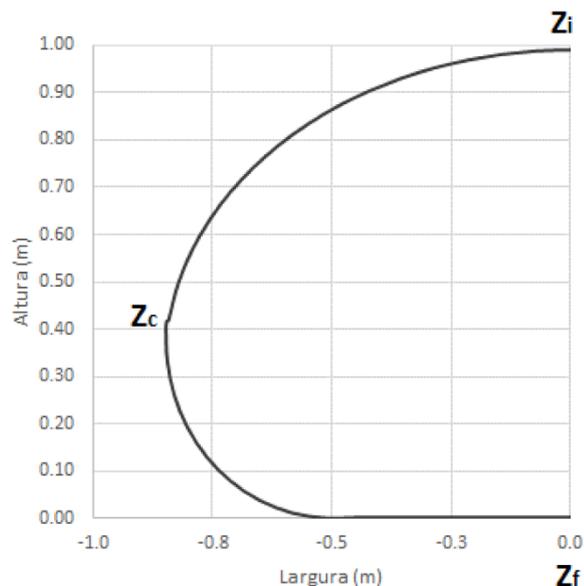


Figura 34 – Identificação dos pontos de referência no modelo numérico.

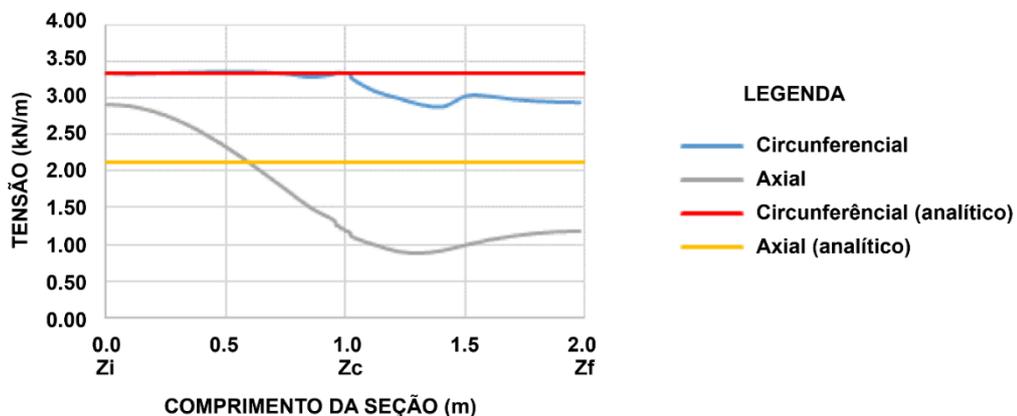


Silva (2019) analisou que no ponto de maior altura do tubo geossintético a tensão encontrada é equivalente a 3,34 kN/m, semelhante à tensão encontrada no

método analítico, indicada em vermelho na Figura 35, de 3,35 kN/m. A partir do momento em que a seção passa pelo ponto de maior curvatura ( $Z_c$ ), a tensão circunferencial na parte inferior do tubo geossintético tornou-se ligeiramente menor em relação à parte superior, onde ocorre o contato com a fundação. De acordo com Lawson (2008), esperava-se que uma maior tensão circunferencial atuasse na extremidade do tubo, local onde é encontrada a sua maior curvatura. Esse comportamento não foi observado na modelagem numérica.

Em relação à tensão axial, o autor analisou que esta tem menor magnitude que a tensão circunferencial: ela se inicia na ordem de 3,0 kN/m e diminui ao longo da seção até o contato com a fundação, onde permanece mais estável. Palmerton (2002) apresentou a da relação de 0,63 entre tensão axial e tensão circunferencial, chegando ao valor analítico de 2,11 kN/m (em amarelo) para esta análise. Portanto, os valores encontrados pelas duas abordagens são próximos.

Figura 35 – Variação das tensões ao longo da metade da seção do tubo (seção transversal).



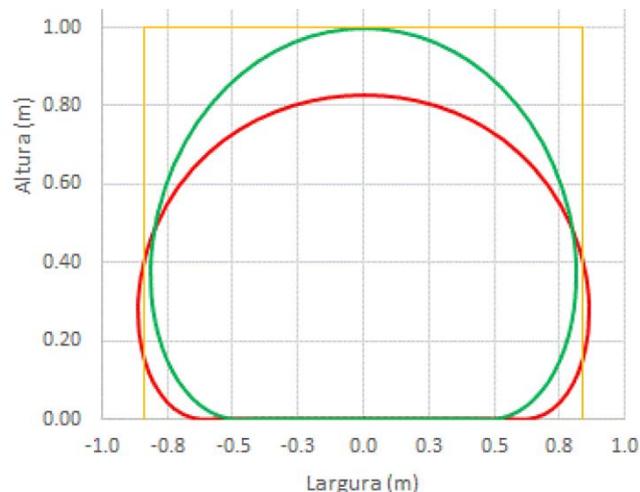
Fonte: Adaptado de Silva (2019).

Em relação à retroanálise dos ensaios de campo de Silva (2017), que utilizou tubos geotêxteis feitos a partir de geotêxtil tecido, e a partir dos dados geométricos obtidos (a altura máxima da seção transversal de 1,00 m e largura da seção transversal de 1,67 m - em amarelo na Figura 36) foi realizada a modelagem numérica a fim de se obter as tensões geradas e pressão interna *in situ*.

Silva (2019) aplicou carregamento hidrostático à modelagem, mantendo o mesmo procedimento realizado para retroanálise analítica: pressão hidrostática de 14,22 kPa referente a 1,0m de altura do tubo, verificando que a altura máxima atingida foi de 0,826 m (em vermelho na Figura 36), valor bem próximo ao alcançado na

retroanálise analítica, de 0,82 m. Então o autor aplicou incrementos de pressão até atingir 1,0 m de altura, tendo encontrado uma pressão total de 21,33 kPa, ou seja, a pressão de bombeamento era equivalente a aproximadamente 7 kPa. Os valores encontrados também são muito próximos do método analítico, que apresentou pressão total de 21,23 kPa. Em relação aos parâmetros geométricos, para altura de 1,0 m, obteve-se largura de 1,63 m (em verde, na Figura 36).

Figura 36 – Dimensões o tubo geotêxtil em campo (amarelo), com altura 0,826m (em vermelho) e com 1,0m de altura (em verde).



Fonte: Silva (2019).

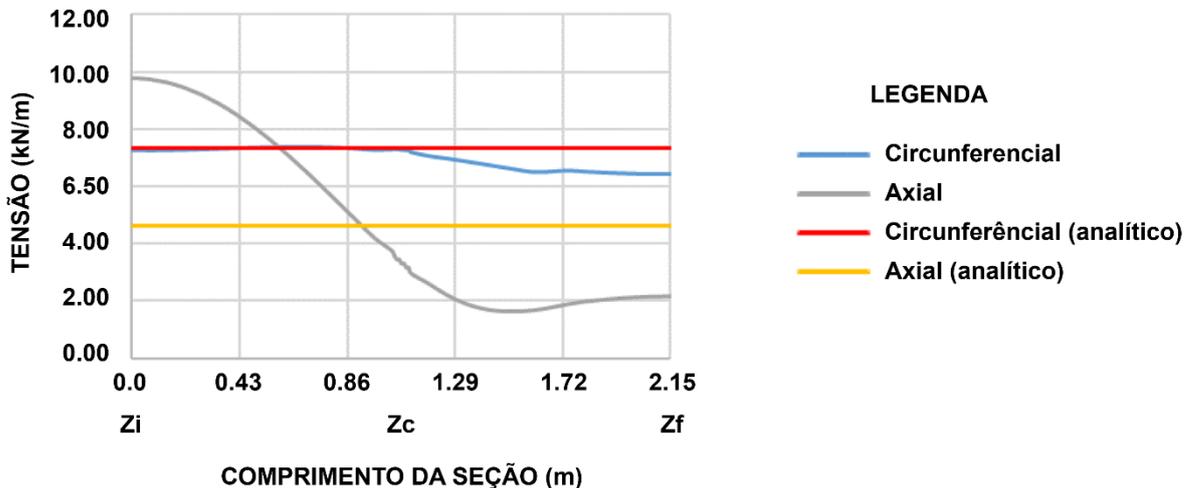
A tensão circunferencial ao longo da seção transversal está representada pela linha azul na Figura 37, enquanto a linha cinza simboliza a tensão axial ao longo da seção transversal. A tensão circunferencial inicia em  $Z_i$  com valor positivo (tração) e possui menor magnitude quando entra em contato com a fundação. Ainda na Figura 37, em vermelho está a tensão correspondente ao método analítico (7,32 kN/m), que ficou bem próxima do valor encontrado na modelagem numérica (7,28 kN/m).

A tensão axial, representada pela linha cinza (Figura 37), começa com valor de aproximadamente 10kN/m na parte superior do tubo geotêxtil, reduzindo sua quantidade até a região de contato com a fundação, onde permanece aproximadamente constante. Essa tensão obtida, por meio do método analítico e relação de Palmerton (2002), está representada pela linha amarela. O valor encontrado através do método analítico (4,61 kN/m) é semelhante ao da modelagem numérica (4,47 kN/m).

Silva (2019) aponta que se esperava que a tensão circunferencial fosse maior que a axial, conforme apresentado por Lawson (2008), mas acredita que, como a

forma de seção circular do tubo geotêxtil não foi alcançada para este nível de pressão interna, a tensão circunferencial foi menor que a axial.

Figura 37 – Tensões na seção transversal obtida por modelagem numérica para a retroanálise do estudo de campo de Silva (2017).



Fonte: Silva (2019).

## 2.8 DEGRADAÇÃO DE GEOTÊXTEIS

Lopes e Carneiro (2019) apontam que uma questão fundamental sobre a utilização dos geossintéticos dá-se em torno do tempo em que estes manterão os valores mínimos de suas propriedades num determinado ambiente, pois é necessário que o material tenha seu desempenho garantido durante toda a vida útil da obra.

São exemplos de causa de degradação:

- degradação físico-química e/ou biológica;
- deterioração durante as operações de transporte, manuseamento e colocação em obra;
- agentes de degradação mecânicos.

A avaliação da durabilidade dos geossintéticos requer um estudo dos efeitos do tempo nas propriedades funcionais dos materiais. Este estudo consiste em identificar os agentes de degradação relevantes, estimar a evolução das propriedades dos geossintéticos ao longo do tempo e determinar os fatores de redução adequados e/ou as propriedades disponíveis no fim do tempo de vida útil, para então, no dimensionamento, aplicar os fatores adequados à obra em questão.

Um tubo geotêxtil apresenta duas grandes etapas de utilização: os ciclos de enchimento e drenagem seguido da consolidação e a etapa de disposição. Na primeira, ocorrem as maiores solicitações mecânicas devido à pressão de enchimento, ocorrendo também o contato do geotêxtil com o resíduo bombeado, que pode degradá-lo por agentes físico-químicos e/ou biológicos. Deve-se garantir, portanto, que as propriedades necessárias ao geotêxtil para suportar os ciclos, se mantenham até o fim desta etapa.

Sobre a consolidação, os esforços atuantes, devido a secagem do material de enchimento, se tornam menores, não sendo um ponto crítico da análise. Caso o tubo seja aberto e seu material de preenchimento enviado a aterros sanitários, a vida útil se encerra, e então, o foco da análise seria voltado apenas para os ciclos de enchimento.

Entretanto, como apresentado anteriormente, uma das opções de disposição é o empilhamento das unidades de tubos geotêxteis. Neste caso, seria necessária uma avaliação das solicitações externas ao tubo e o tempo de vida útil do empilhamento, em que o geotêxtil passa a atuar como um elemento de reforço.

### **2.8.1 Métodos para avaliação da durabilidade**

A avaliação é feita comparando-se os resultados de ensaios realizados em relação a uma propriedade do material intacto com os resultados dessa mesma propriedade em material exposto aos agentes de degradação.

Segundo Lopes e Carneiro (2019), a resistência à tração é uma das propriedades mais frequentemente monitoradas. Entretanto, a depender da influência do agente de degradação, são possíveis propriedades de interesse a serem monitoradas:

- monitoramento de propriedades físicas (massa por unidade de área, espessura);
- monitoramento de propriedades mecânicas (exemplo: comportamento à tração, ao rasgo, ao puncionamento);
- monitoramento de propriedades hidráulicas (permissividade, transmissividade);
- monitoramento do aspecto visual;

- monitoramento de propriedades químicas.
- alguns exemplos de ensaios que podem auxiliar no monitoramento:
- microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- microanálise por raio X;
- espectroscopia de infravermelho (ex. FTIR);
- análise térmica (ex. calorimetria diferencial de varrimento);
- cromatografia líquida (detecção UV, detecção de massa).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos de forma detalhada os experimentos desenvolvidos em campo e em laboratório, apresentando materiais e métodos utilizados, com o objetivo de monitorar dois tubos geotêxteis não tecidos preenchidos com lodo, um sem e o outro com a utilização de polímero floculante, instalados em Estação de Tratamento de Água.

Todas as análises experimentais foram realizadas na ETA Jardim Bela Vista (Nova Odessa, SP) e nos laboratórios de Mecânica dos Solos e de Geossintéticos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (São Carlos, SP).

O desenvolvimento deste trabalho ocorreu de forma concomitante ao trabalho de Aparicio-Ardila (2020), que possuía o objetivo de avaliar o desaguamento de lodo de ETA em sistemas fechados de geotêxtil não tecido por meio de ensaios de semi-desempenho (ensaios de cone e tubo geotêxtil em escala reduzida).

O desenvolvimento das pesquisas de forma paralela foi realizado com o objetivo de reproduzir o maior número de parâmetros nos dois trabalhos, minimizando a fonte de variabilidade, a fim de encontrar correlações entre ensaios de bancada e a utilização de tubos geotêxteis em verdadeira grandeza.

Portanto, primeiramente será apresentada a ETA, local das duas pesquisas, e em seguida, a caracterização dos materiais e alguns resultados de interesse da pesquisa de Aparicio-Ardila (2020), que serão utilizados nas análises deste trabalho.

#### 3.1 O LOCAL - ETA JARDIM BELA VISTA (NOVA ODESSA-SP)

A Estação de Tratamento de Água do Jardim Bela Vista é de competência da Companhia de Desenvolvimento de Nova Odessa (CODEN), uma empresa de economia mista, cujas ações pertencem majoritariamente à própria Prefeitura Municipal, responsável desde 1980 pelos serviços de Saneamento Básico (água e esgoto) de Nova Odessa, através de concessão pública.

É uma ETA do tipo convencional de ciclo completo que trata em média 15,5 milhões de litros de água por dia, sendo a captação 100 % realizada em mananciais (represas) do próprio território de Nova Odessa.

Para o processo de coagulação é usado o Policloreto de Alumínio (PAC 10), o qual é um polímero inorgânico, catiônico de baixo peso molecular a base de Cloreto de Polialumínio (PAC).

O lodo bombeado para os tubos geotêxteis era proveniente das descargas de lavagem dos 4 decantadores, enumerados na Figura 38. Cada decantador é lavado uma vez ao mês, as quartas-feiras, sendo um decantador por semana. Assim, por exemplo, na primeira quarta-feira do mês, lava-se o “Decantador 1”, na segunda, o “Decantador 2” e assim por diante, até que ao fim do mês, todos foram lavados e reinicia-se o ciclo.

A área selecionada para disposição dos tubos geotêxteis encontrava-se bem próxima aos decantadores, como também é possível verificar na Figura 38, destacada em amarelo.

Vilella (2011) reporta em seu trabalho a experiência da ETA Bela Vista com o desaguamento de lodo. Na época, o tratamento produzia 3m<sup>3</sup> de lodo não desaguado por dia. O processo de desaguamento e secagem era realizado na seguinte forma: o lodo, ao ser retirado dos decantadores, apresentava umidade de aproximadamente 95%. Após permanecer em repouso por 24 horas, verificava-se que cerca de 30% do volume (sobrenadante) era de água com turbidez abaixo de 5UNT que podia ser retornado ao sistema de tratamento. O lodo adensado era disposto em leitos de drenagem ou em “bags” de polipropileno (Figura 39), permanecendo por um período de aproximadamente 30 dias. Atualmente, este sistema não está mais em operação devido aos longos períodos de exposição do lodo ao ar livre, gerando riscos para a saúde e, também, devido a problemas com o transporte dos *bags*, que eram de difícil manuseio para a disposição no local de secagem final.

Figura 38 – Vista aérea ETA Bela Vista com numeração dos decantadores. Em amarelo, área de disposição dos tubos geotêxteis.



Fonte: Google Earth (2021).

Figura 39 – a) Disposição dos bags verticais e abertos, sendo utilizados para desaguamento do lodo na ETA. Fonte: Pessoa (2007) e b) Leitões de secagem final.



Fonte: BioCiclo (2011).

Também, em 2011, foram feitos ensaios para a reutilização do lodo em blocos cerâmicos e avaliado seu potencial agrônomo para nutrição de milho (GANDARA; BERTON, 2010).

A experiência da ETA Bela Vista com diferentes tecnologias mostra sua abertura em realizar ensaios e aprimorar suas técnicas de desaguamento e de destinação do lodo produzido. Atualmente, está em andamento o projeto de instalação de centrífugas desaguadoras. Com a realização dos ensaios com tubos geotêxteis, os

resultados e custos-benefícios comparando as tecnologias estão em estudo por sua equipe técnica.

Na Figura 38 a área demarcada pelo tracejado amarelo possui a infraestrutura mostrada na Figura 40: foi construído uma estrutura metálica com piso em concreto e ao lado, um pátio com piso intertravado. Os tubos geotêxteis foram dispostos no pátio, sendo possível instalar os equipamentos a serem mostrados a seguir e utilizar a área coberta como ponto de apoio para realização dos ensaios e para abrigar partes elétricas ou mais sensíveis dos equipamentos.

Figura 40 – Estrutura metálica com piso em concreto a direita e pátio com piso intertravado a esquerda.



Fonte: a autora.

## 3.2 RESULTADOS UTILIZADOS DA PESQUISA DE APARICIO-ARDILA (2020)

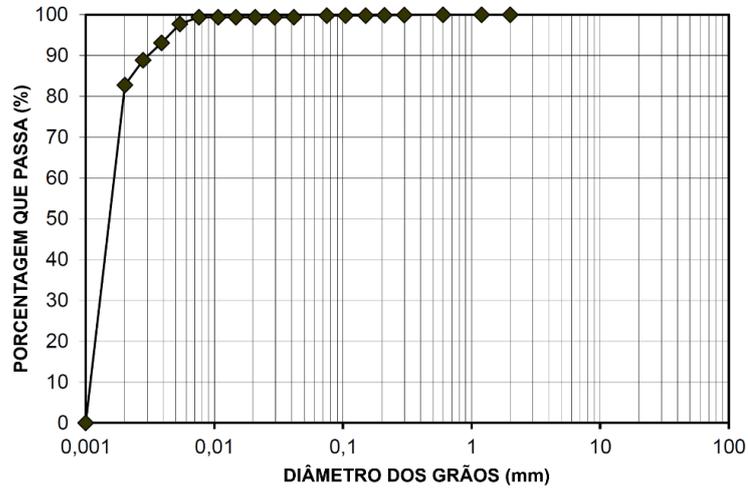
### 3.2.1 Caracterização do lodo

O lodo da ETA Jardim Bela Vista apresentou massa específica dos grãos de  $2,4 \text{ g/cm}^3$ .

A distribuição granulométrica do lodo foi realizada com uso do defloculante hexametáfosfato de sódio e foi preciso adaptar o peso das amostras para a realização dos ensaios, que seguiram de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 6458 (ABNT, 2017) e ABNT NBR 7181 (ABNT, 2016). A curva granulométrica do lodo

(Figura 41), mostra que a distribuição de tamanho dos grãos está composta por 0,5 % de areia, 16,5 % de silte e 83,0 % de argila.

Figura 41 – Granulometria dos sólidos presentes no lodo da ETA Jardim Bela Vista.



Fonte: Aparicio-Ardila (2020).

A determinação dos teores de sólidos totais, fixos e voláteis foi realizada de acordo com o procedimento de ensaio n° 2540G, e a determinação dos mg/L de lodo de sólidos totais, fixos e voláteis foi realizada de acordo com os procedimentos de ensaio n° 2540B e 2540E do Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA; AWWA; WEF, 2017). Os resultados obtidos para a amostra de caracterização estão apresentados na Tabela 4. É importante ressaltar que estes procedimentos também foram utilizados para todos os teores de sólidos determinados na pesquisa atual.

Tabela 4 – Sólidos totais, fixos e voláteis da amostra única de lodo utilizada para caracterização inicial.

Parâmetro	%	mg/L
Sólidos Totais	3,8	187.500
Sólidos Fixos	41,2	77.280
Sólidos Voláteis	58,8	110.220

Fonte: Aparicio-Ardila (2020).

### 3.2.2 Caracterização do geotêxtil

As propriedades características do geotêxtil, obtidos por ensaios de caracterização realizados por Aparicio-Ardila (2020), material que esta autora denominou com GTX1, estão apresentadas na Tabela 5. Não foi possível a elaboração do ensaio de determinação da abertura de filtração característica pela ABNT NBR ISO 12956 (ABNT, 2013a), devido à limitação do tamanho das esferas disponíveis no laboratório. Este valor foi adotado da declaração de desempenho do produto apresentada pelo fabricante. Este geotêxtil foi utilizado tanto para fabricação dos itens utilizados nos ensaios de semi-desempenho de Aparicio-Ardila (2020), quanto para os tubos geotêxteis em escala real deste trabalho.

Tabela 5 – Propriedades características do geotêxtil.

<b>Propriedades Mecânicas</b>		
Resistência a tração faixa larga (L)	28 kN/m	ABNT NBR ISO 10319
Alongamento (L)	85%	
Resistência a tração faixa larga (T)	35 kN/m	ASTM D 4833
Alongamento (T)	89%	
Puncionamento	1262 N	ABNT NBR ISO 12236
Puncinamento CBR	5,8 kN	ASTM D 4533
Rasgo trapezoidal (L)	1151 N	
Rasgo trapezoidal (T)	896,6 N	ASTM D 3786
Resistência ao estouro	3,1 MPa	
Emenda	26,54 kN/m	ABNT NBR ISO 10321
<b>Propriedades Hidráulicas</b>		
Permissividade	1,36	ASTM D 4491
Permeabilidade normal	0,584 cm/s	ASTM D 4491
Abertura de filtração	0,04 mm	ABNT NBR ISO 12956
Abertura aparente de poros	< 0,1 mm	ASTM D 4751
<b>Propriedades Físicas</b>		
Massa por unidade de área	612 g/m <sup>2</sup>	ASTM D 5261
Espessura	4,29 mm	ASTM D 5199

Fonte: Aparicio-Ardila (2020).

### 3.2.3 Polímero floculante

Em relação ao polímero, Aparicio-Ardila (2020) realizou ensaios de cone com e sem o uso de polímero, testando 10 tipos diferentes em 3 concentrações. O polímero de melhor desempenho foi o Superfloc 8396, apresentado na Tabela 6, que também

foi o utilizado nos ensaios de verdadeira grandeza. Apenas os resultados com este polímero serão apresentados abaixo.

Tabela 6 – Polímero de melhor desempenho no ensaio de cone.

<b>Característica</b>	Superfloc 8396
<b>Natureza química</b>	Poliacrilamida
<b>Tipo / Forma</b>	Pó / Sólido branco granulado
<b>Densidade de Carga (% mol)</b>	Catiônica 40
<b>Peso molecular</b>	Muito alto
<b>Densidade (g/cm³)</b>	0,75
<b>pH solução aquosa</b>	3,0 - 5,0

Fonte: Aparicio-Ardila (2020).

### 3.2.4 Resultados do ensaio de cone

Foram utilizados dois tipos de geotêxtil não tecido e para referência dos dados, dois tipos de geotêxtil tecido. Os ensaios foram planejados de forma a ser empregada a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), onde as variáveis analisadas foram a concentração de sólidos totais do resíduo inicial e a dosagem de polímero, avaliando índices de retenção e índices de desaguamento.

Foram selecionados os resultados dos ensaios número 2, 4 e 6, denominados 1A, 1C e 1B, respectivamente para apresentação dos resultados, conforme mostra a Tabela 7, que apresentam concentração de sólidos de 2 % (20 g/l) e resultados sem adição de polímero e com adição em duas dosagens diferentes do Superfloc 8396. O volume de lodo utilizado para cada ensaio foi de 2000 cm³. A Tabela 7 também apresenta o valor PD, que representa o percentual de desaguamento e é determinado com base na umidade inicial ( $w_{inicial}$ ), em porcentagem e na umidade final do resíduo retido no geotêxtil ( $w_{final}$ ), também em porcentagem, através da Equação 16.

$$PD = \frac{w_{inicial} - w_{final}}{w_{inicial}} \times 100 (\%) \quad (16)$$

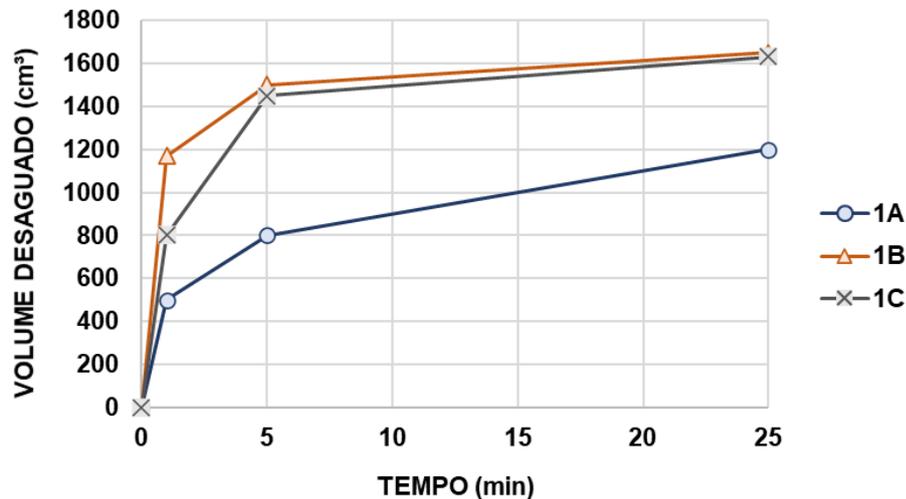
Tabela 7 – Ensaios selecionados para ensaios de cone.

Ensaios		Variáveis			Resultados GTX1		
Nº	Nome	Sólidos Totais Inicial (g/l)	Dosagem de polímero (mgPol/gST)	Turbidez do filtrado (UNT)	Volume desaguado (cm <sup>3</sup> )	Teor de sólidos (%)	PD (%)
2	1A	20	0	29,2	1200	3,0	34,5
4	1C	20	3,4	22,5	1650	14,2	87,7
6	1B	20	1,7	27,5	1630	15,4	88,8

Fonte: Aparicio-Ardila (2020).

Como parte dos resultados obtidos, abaixo é apresentada na Figura 42 a curva de volume desaguado para cada ensaio ao longo do tempo.

Figura 42 – Curva do volume desaguado para os ensaios 1A, 1B e 1C.



Fonte: Aparicio-Ardila (2020).

É possível perceber que um maior volume desaguado é obtido quando comparado os ensaios com e sem a utilização de polímero. Com base nessa observação, a autora realizou uma avaliação do desaguamento, apresentada na Tabela 8, através da taxa de deságue, calculada dividindo-se o volume de efluente coletado pelo tempo de desaguamento, e da eficácia do polímero, obtida pela Equação 17, onde  $TD_{lodo}$  se refere à taxa de desaguamento ocorrida no ensaio sem condicionamento químico do lodo, em cm<sup>3</sup>/s e  $TD_{lodo,cond}$ , à taxa de desaguamento ocorrida no ensaio com condicionamento químico do lodo, em cm<sup>3</sup>/s.

$$\text{Eficácia do polímero} = \frac{TD_{lodo,cond} - TD_{lodo}}{TD_{lodo}} \times 100 (\%) \quad (17)$$

Tabela 8 – Avaliação da eficácia do polímero em função da taxa de deságue nos ensaios de cone.

Ensaio		Taxa de deságue	Eficácia do polímero
Nº	Nome	( $cm^3/s$ )	(%)
2	1A	0,80	
4	1C	1,09	35,83
6	1B	1,10	37,50

Fonte: Aparicio-Ardila (2020).

### 3.2.5 Resultados do ensaio de bolsa fechada

Aparicio-Ardila (2020) realizou ensaios em tubo geotêxtil em escala reduzida, os quais denominou ensaios de bolsa fechada. Foram utilizados dois tipos de geotêxtil não tecido e para referência dos dados, dois tipos de geotêxtil tecido. Os ensaios foram planejados de forma a ser empregada a MSR, onde as variáveis analisadas foram a concentração de sólidos totais do resíduo inicial e a dosagem de polímero, avaliando índices de retenção e índices de desaguamento.

Foram selecionados os resultados dos ensaios número 2, 4 e 6, denominados 1A, 1C e 1B, respectivamente para apresentação dos resultados, conforme mostra a Tabela 9, que apresentam concentração de sólidos de 2 % (20 g/l) e resultados com adição do polímero Superfloc 8396 em três dosagens diferentes. O volume de lodo utilizado para cada ensaio foi de 30 l preenchendo a bolsa em ciclo único. O volume desaguado foi obtido após 24 h do início do ensaio e o teor de sólidos, após 168 h. A turbidez foi medida após 5 min e 25 min. A Tabela 9 também apresenta o valor PD, calculado pela Equação 16.

Tabela 9 – Ensaios selecionados para ensaios de bolsa fechada.

Ensaio		Variáveis			Resultados GTX1			
Nº	Nome	Sólidos Totais Inicial (g/l)	Dosagem de polímero (mgPol/gST)	Turbidez 5min (UNT)	Turbidez 25min (UNT)	Volume desaguado ( $cm^3$ )	Teor de sólidos (%)	PD (%)
2	1A	20	0,8	108,3	10,4	28696	0	0
4	1C	20	2,6	71,9	51,0	23570	34,7	96,2
6	1B	20	1,7	39,9	32,3	25060	35,3	96,3

Fonte: Aparicio-Ardila (2020).

Aparicio-Ardila (2020) também apresentou curvas de secagem para lodo com concentração de sólidos totais inicial de 20 g/L. A fim de resumir os resultados encontrados, no dia em que foram abertas as bolsas após 1 mês de ensaio (720 h), foram obtidos respectivamente para os cenários 1A, 1B e 1C, os teores aproximados de 60%, 40% e 40%. As curvas apresentam uma maior evolução do teor de sólidos nas primeiras 168 h e após esse período, continuam a evoluir, porém em menor intensidade.

Como informações complementares, temos os dados apresentados nas Tabelas 10 e 11, que mostram o volume efluente acumulado em porcentagem e a turbidez ao longo do tempo.

Tabela 10 – Volume efluente acumulado (%) para ensaio de bolsa fechada.

<b>Tempo</b> <i>(min)</i>	<b>Cenário</b>		
	<b>1A</b>	<b>1B</b>	<b>1C</b>
5	40,67	63,33	61,27
25	71,67	82,07	76,40
60	78,33	82,58	77,73
120	79,50	82,70	78,13
1440	79,65	83,53	78,57

Fonte: Aparicio-Ardila (2020).

Tabela 11 – Turbidez (UNT) ao longo do desaguamento para ensaio de bolsa fechada.

<b>Tempo</b> <i>(min)</i>	<b>Cenário</b>		
	<b>1A</b>	<b>1B</b>	<b>1C</b>
5	233,00	39,93	71,90
25	25,03	32,33	50,98
60	26,73	9,66	10,97
120	6,58	9,13	1,48
1440	155,00	3,65	54,30

Fonte: Aparicio-Ardila (2020).

Outro dado coletado pela autora foi a variação da permissividade após desaguamento. Foi fixado o nível de confiança de 98% para a determinação do intervalo de confiança da propriedade de permissividade. Na Tabela 12, apresentam-

se os valores médios com o intervalo de confiança (entre parênteses) em cada cenário avaliado, no qual R é o valor da amostra virgem.

Tabela 12 – Permissividade inicial (R) e após ensaios de desaguamento nos cenários avaliados.

Cenário	Permissividade ( $s^{-1}$ )
R	1,36 ( $\pm 0,25$ )
1A	0,77 ( $\pm 0,16$ )
1B	1,02 ( $\pm 0,09$ )
1C	0,88 ( $\pm 0,18$ )

Fonte: Aparicio-Ardila (2020).

### 3.3 TUBO GEOTÊXTIL

O tubo geotêxtil utilizado foi fabricado a partir do geotêxtil não tecido de fibra cortada de poliéster apresentado na Tabela 5. A Figura 43 apresenta as dimensões do tubo vazio medidas em campo, em que as medidas internas a costura (largura 4,6 m, perímetro 9,2 m e comprimento 9,76 m) serão as utilizadas no tratamento dos dados. O tubo possui apenas um bocal de enchimento centralizado (Figura 44), com diâmetro de 6 polegadas e 70 cm de comprimento, dotado de flanges metálicas na intersecção com o tubo geotêxtil.

Segundo informações do fabricante, este tubo geotêxtil possui dimensões nominais de 4,8 m de largura, 10 m de comprimento, altura máxima de enchimento de 1,30 m para lodos com densidade de até 1,2 g/cm<sup>3</sup> e possui capacidade de armazenamento de 45 m<sup>3</sup>. É importante lembrar que a altura máxima de enchimento recomendada pelo fabricante deve ser determinada através de metodologias de dimensionamento que levem em consideração a pressão de enchimento, as características do lodo, as características do geotêxtil (como resistência a tração, deformações, comportamento em fluência), número de ciclos de enchimento e deságue, resistência da costura (com 95% de confiança) considerando sua localização na região mais solicitada do tubo e os fatores de degradação aos quais este tubo estará exposto em campo.

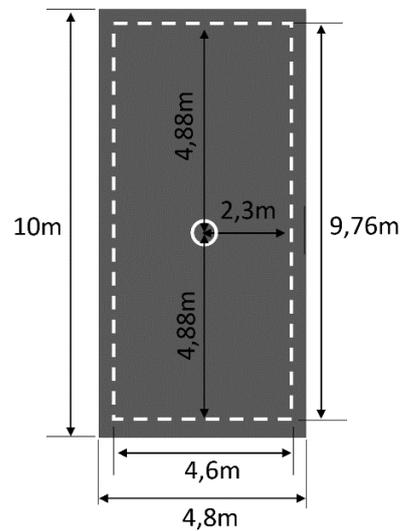
A Tabela 13 apresenta as propriedades do tubo geotêxtil, classificadas como características de controle, retiradas da Declaração de Desempenho, apresentada pelo fabricante, em atendimento a norma ABNT NBR 16757-1 (ABNT, 2021a).

Tabela 13 – Declaração de desempenho do fabricante.

Propriedade	Norma	Valor Nominal	Valor de Tolerância
Resistência à tração	ABNT NBR ISO 10319	31 kN/m (T)	0,44 kN/m (T)
Alongamento na carga máxima		29 kN/m (L) > 70%	0,41 kN/m (L) 3%
Puncionamento CBR	ABNT NBR ISO 12236	5,5 kN	0,1 kN
Perfuração dinâmica	ABNT NBR ISO 13433	835 N	12 N
Abertura de filtração característica	ABNT NBR ISO 12956	0,04 mm	0,002 mm
Permeabilidade	ABNT NBR ISO 11058	0,55 cm/s	0,03 cm/s

Fonte: a autora.

Figura 43 – Dimensões do tubo vazio medidas em campo.



Fonte: a autora.

Figura 44 – Bocal de enchimento com flange metálica.



Fonte: a autora.

### 3.4 CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS

Foram realizados dois ensaios de verdadeira grandeza, cada um com um tubo geotêxtil que possuía as características apresentadas no item 3.3, sendo o primeiro preenchido com lodo in natura e o segundo com adição de polímero floculante.

A linha do tempo apresentada na Figura 45 apresenta a sequência temporal destes ensaios e as nomenclaturas adotadas: o primeiro tubo geotêxtil foi preenchido em 4 ciclos de enchimento, às quartas feiras, com o lodo da lavagem dos decantadores, sem adição de polímero e recebeu a nomenclatura SCR-S, sendo identificados cada um de seus enchimentos como SCR-S1 a SCR-S4. Após os ciclos, este tubo ficou disposto para evoluir em teor de sólidos por 103 dias, tendo sido removido em 16 de setembro de 2019.

O segundo tubo geotêxtil foi preenchido em 5 ciclos de enchimento, também às quartas feiras, com o lodo da lavagem dos decantadores, recebendo a adição de polímero e recebeu a nomenclatura SCR-C, sendo identificados cada um de seus enchimentos como SCR-C1 a SCR-C5. Após os ciclos, este tubo ficou disposto para evoluir em teor de sólidos por 34 dias, tendo sido removido em 10 de dezembro de 2019.

As instalações ideais para o uso de tubos geotêxteis em ETAs envolvem o uso de um tanque de equalização, onde o lodo é homogeneizado e o enchimento do tubo feito sob bombeamento controlado. Entretanto, para a execução destes experimentos, não foi possível a utilização de um tanque de equalização, pois a ETA ainda não possuía esta unidade construída em suas instalações.

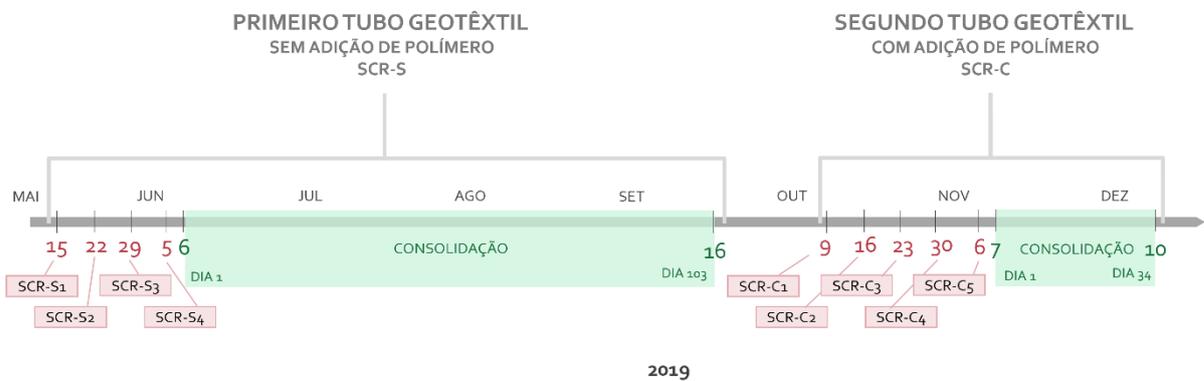
Cada decantador, de onde o lodo é proveniente, é dotado de um registro e de uma tubulação, que se conecta a uma tubulação central, que passa por um poço de visita. Nesse poço, quando no momento da descarga do decantador e enchimento do tubo, as saídas foram vedadas e foi instalada uma bomba, de forma que o lodo pudesse ser bombeado para dentro do tubo geotêxtil, instalado dentro de uma “piscina”, que será apresentada a seguir. A Figura 46 ilustra esquematicamente esse processo.

Para o enchimento do SCR-S, a tubulação de recalque da bomba (em vermelho no esquema da Figura 46), possuía um medidor de vazão do lodo de entrada e um registro, para auxiliar no desligamento da bomba. Para o enchimento do SCR-

C, em que o lodo recebia a adição de polímero flocculante, foi realizada uma intervenção nesta tubulação.

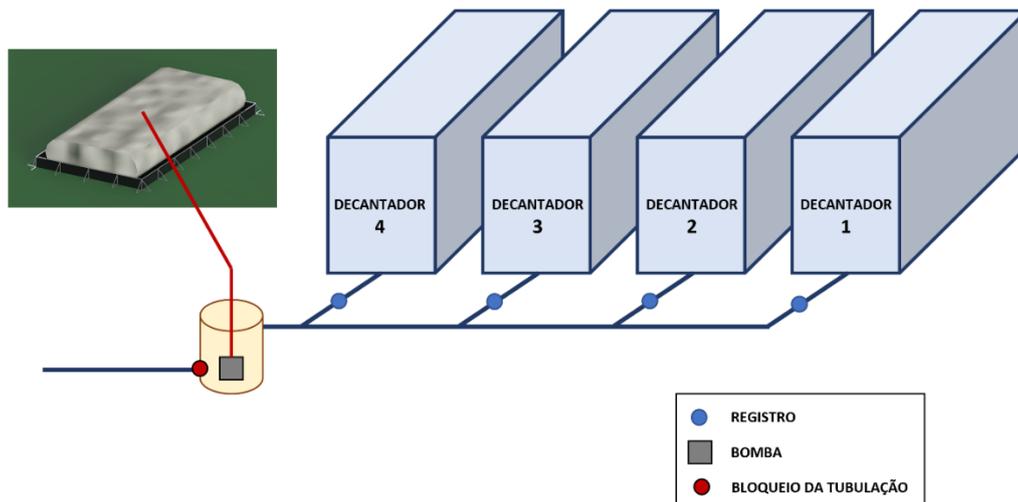
Essa intervenção possuía um ponto de entrada para adição de polímero por uma bomba dosadora, uma sequência de curvas com o objetivo de promover a agitação e mistura das partículas do lodo com o polímero, obtendo flocos, um ponto de tomada de amostras para verificação da flocculação, um medidor de vazão e um registro. A Figura 47 mostra esquematicamente os itens descritos.

Figura 45 – Linha do tempo dos ensaios de campo.



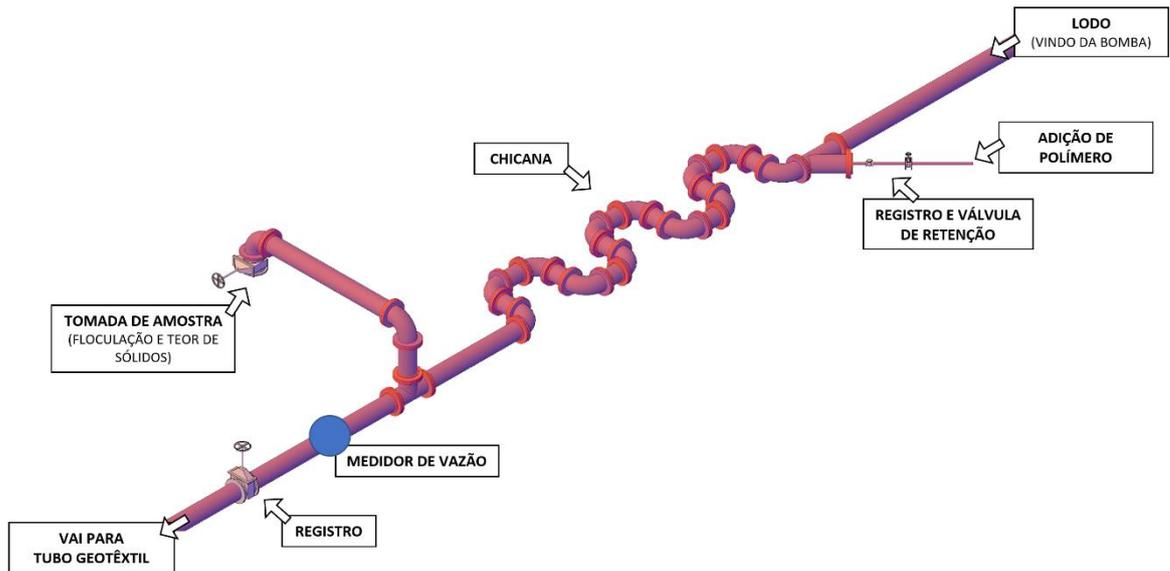
Fonte: a autora.

Figura 46 – Esquema das instalações da ETA e adaptações feitas para permitir o bombeamento



Fonte: a autora.

Figura 47 – Esquema da intervenção na tubulação de recalque para o tubo geotêxtil preenchido com lodo com adição de polímero.



Fonte: a autora.

### 3.5 INFRAESTRUTURA PARA INSTALAÇÃO DOS TUBOS GEOTÊXTEIS

O pátio de piso intertravado apresentado na Figura 40, utilizado para disposição dos tubos geotêxteis, foi limpo com o objetivo de remover qualquer objeto que pudesse perfurá-lo. Foram então instalados: um geotêxtil não-tecido de alta massa por unidade de área ( $900 \text{ g/m}^2$ ) para proteção das camadas subsequentes: uma camada de baixa permeabilidade, sendo uma geomembrana de PVC, para o primeiro tubo (Figura 48), e uma lona automotiva confeccionada com tecido de polietileno de alta densidade recoberto com duas camadas de polietileno de baixa densidade, para o segundo tubo (Figura 49), uma camada de geocomposto drenante e por fim, o tubo geotêxtil.

Normalmente a camada drenante abaixo do tubo geotêxtil é executada com brita, para além da drenagem, auxiliar na regularização do terreno. Como o terreno encontrava-se com inclinação adequada para utilização dos tubos geotêxteis, optou-se pelo uso do geocomposto drenante para avaliar em termos qualitativos um berço feito totalmente em geossintéticos.

O liner de baixa permeabilidade foi fixado através de ilhoses com abraçadeiras de nylon a uma estrutura metálica no formato de “piscina” para abrigar o tubo geotêxtil em seu interior. Posteriormente, foi montado um pórtico na linha central transversal do tubo para instalação dos equipamentos.

Figura 48 – Estrutura para monitoramento do tubo geotêxtil preenchido com lodo sem polímero.



Fonte: a autora.

Figura 49 – Infraestrutura para monitoramento do tubo geotêxtil preenchido com lodo com polímero (apesar de não ser possível visualizar na imagem, o GCD encontra-se instalado abaixo no tubo geotêxtil).



Fonte: a autora.

### 3.6 EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS DE MONITORAMENTO

Serão apresentados a seguir os equipamentos instalados ao longo dos ensaios para monitorar os SCR-S e SCR-C.

#### 3.6.1 Bomba submersível

A bomba utilizada é da marca SPV Hidrotécnica Brasileira LTDA, modelo EG-1000 e é adequada para recalques de águas sujas, fecais e esgotos leves (Tabela 14

e Figura 50). Foi utilizada para recalcar o lodo do fundo do poço de visita para dentro do tubo geotêxtil. A Figura 51 e a Tabela 15 apresentam respectivamente a curva e tabela de recalque.

Tabela 14 – Informações técnicas – Modelo EG-1000.

<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor nominal</b>
Peso da bomba	kg	48,5
Potência do motor	CV/KW	4,3/3,2
Rotações do motor	rpm	3450
Ciclagem	Hz	60
Voltagem	V	220/380/440
Amperagem	A	13,5/8,0/6,7
Recalque	Ø	BSP 3"
Diâmetro do rotor	mm	120

Fonte: SPV Hidrotécnica Brasileira LTDA (2000).

Figura 50 – Bomba submersível modelo EG-1000.



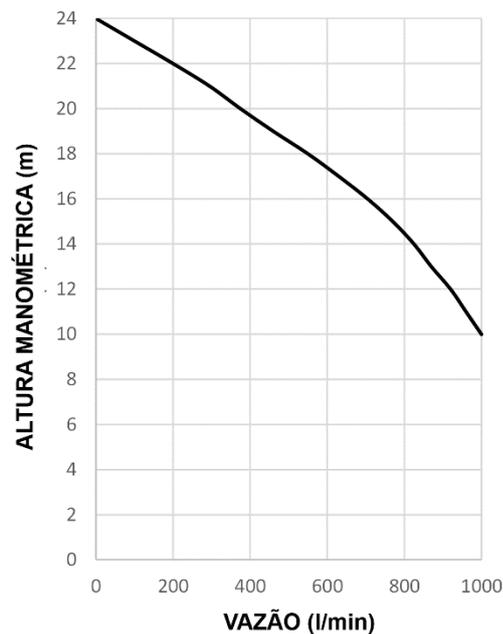
Fonte: SPV Hidrotécnica Brasileira LTDA (2000).

Tabela 15 – Tabela de recalque da bomba.

	mCA	l/min	m <sup>3</sup> /h
Altura manométrica	10	1000	60,0
	11	960	57,6
	12	920	55,2
	13	870	52,2
	14	825	49,5
	15	770	46,2
	16	705	42,3
	17	630	37,8
	18	550	33,0
	19	460	27,6
	20	375	22,5
	21	295	17,7
	22	200	12,0
23	100	6,0	
24	0	0,0	

Fonte: SPV Hidrotécnica Brasileira LTDA (2000).

Figura 51 – Curva de recalque da bomba.



Fonte: SPV Hidrotécnica Brasileira LTDA (2000).

### 3.6.2 Bomba peristáltica

Utilizada para bombear a solução de polímero do reservatório para injeção na tubulação por onde o lodo era bombeado.

A bomba utilizada é da marca Didática SP e é um equipamento utilizado na indústria e em laboratórios para movimentar fluídos em sistemas que precisam de fluxo contínuo ou de dosagem (como era o caso da solução de polímero). O seu funcionamento se dá através do giro de um motor de corrente contínua que possui roletes em seu eixo. Conforme o torque do motor atua, ele movimenta esses roletes, que são responsáveis por comprimir a tubulação. Quando ela volta para a sua dimensão inicial, gera um vácuo que aspira o fluído. Quando o fluído entra na cavidade formada pelos roletes, ele é empurrado para a saída da mangueira, e assim ele é movimentado. A Tabela 16 e a Figura 52 trazem as informações técnicas.

Tabela 16 – Informações Técnicas.

<b>Varição de velocidade</b>	%	20 a 100
<b>Alimentação padrão</b>	Vac - Hz	230 - 50/60
<b>Consumo máximo</b>	mA	600
<b>Sucção</b>	mHg	até 650
<b>Rotação</b>	RPM	14
<b>Vazão regulável por controle de rotação</b>	l/h	1,2 e 6,0
<b>Contra pressão máxima</b>	bar	1,2

Bombeamento de 12 m.c.a ou 100 m na horizontal de acordo com a bitola da mangueira peristáltica (bitola com diâmetro de 6,4 mm)

Fonte: Didática SP (2020).

Figura 52 – Bomba peristáltica.



Fonte: Didática SP (2020).

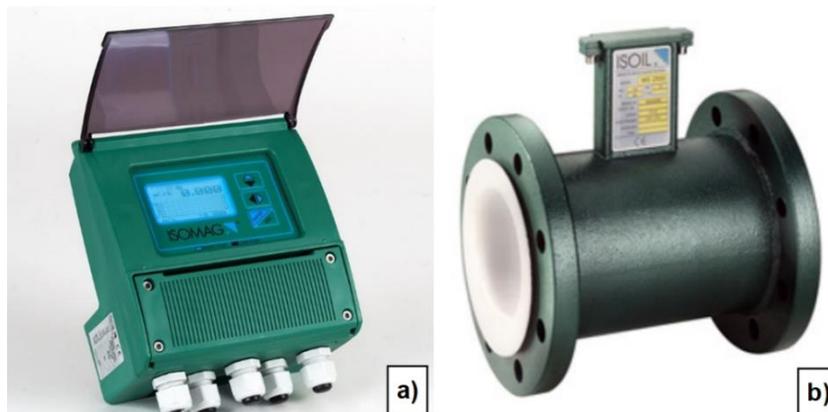
### 3.6.3 Medidor de vazão

Utilizado para medir a vazão de lodo bombeado para o interior do tubo geotêxtil. O medidor utilizado é do fabricante ISOIL, marca ISOMAG e é um sensor de vazão eletromagnético flangeado modelo MS2500 com utilização universal em medição de líquidos e, segundo seu fabricante, destinado a todas as aplicações e ranges de vazão por possuir um amplo range de diâmetros. O medidor utilizado possuía diâmetro de 4 polegadas e era dotado de um conversor com display gráfico retroiluminado para medidor de vazão eletromagnético modelo MV110, também da marca ISOMAG, através do qual foi possível verificar a vazão.

Os equipamentos podem ser encontrados na Figura 53 e abaixo são apresentadas suas especificações técnicas (ISOIL INDUSTRIA, 2020):

- material do corpo: aço carbono e aço inox AISI304/316;
- diâmetro nominal: de DN 25 a DN 2000;
- range de vazão: 0 a 113.000 m<sup>3</sup>/h;
- pressão nominal: de PN 6 a PN 250;
- conexão: flanges de acordo com padrões internacionais;
- temperatura de líquidos: de -20 a +180 °C.

Figura 53 – Medidor de vazão a) Conversor MV110 b) Sensor MS2500.



Fonte: ISOIL Industria (2020).

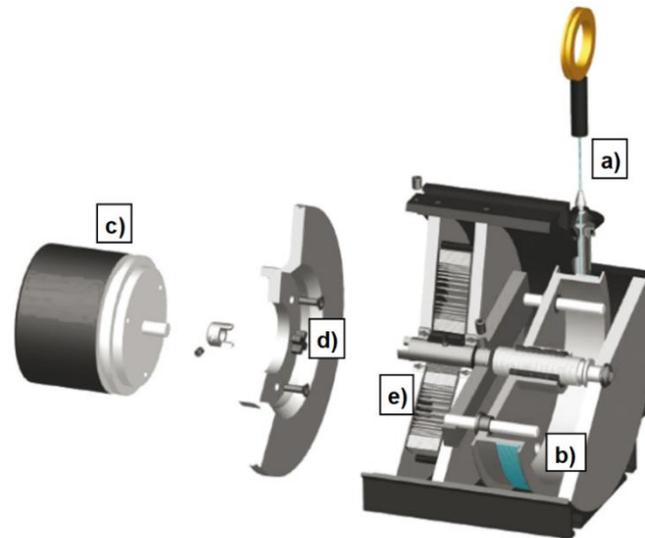
### 3.6.4 Encoder de deslocamento linear por cabo

Utilizado com para medir as deformações circunferencial e axial de uma região e monitorar a altura de enchimento no tubo geotêxtil, portanto foram usados 3 encoders.

Os encoders de deslocamento linear por cabo são dispositivos com princípio de funcionamento eletromecânico e funcionam através da contagem de segmentos de volta de um tambor deslizante, que possui um cabo acoplado ao mesmo. Conforme o cabo é puxado (Figura 54-a), o tambor gira (Figura 54-b), deslocando-se axialmente em relação ao eixo conectado a um encoder contador de incrementos de volta (Figura 54-c). Dessa forma, a saída do cabo permanece alinhada com os respectivos passos de volta do mesmo sobre o tambor, mantendo um diâmetro constante do conjunto cabo-tambor, garantindo acurácia do deslocamento medido pelo equipamento. Na Figura 54-d pode ser observado o elemento de acoplamento do encoder giratório com o sistema de tambor, e na (Figura 54-e) uma mola helicoidal que permite a tração do cabo e recolhimento automático.

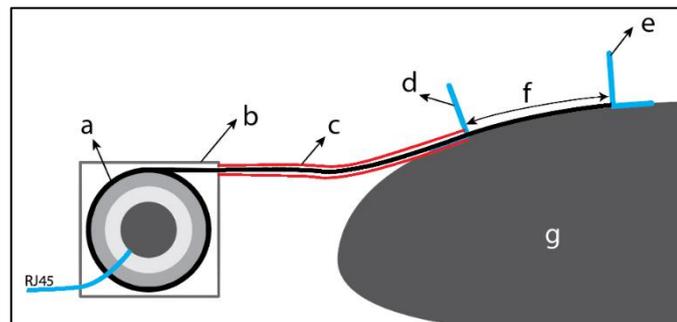
O encoder de deslocamento linear por cabo (Figura 55-a) foi acondicionado em caixas hermeticamente fechadas (Figura 55-b), possuindo duas saídas: uma sendo um cabo de rede (RJ45) para alimentação e transmissão dos dados, e outra um condutor de cabo, conhecido como conduíte, com um metro de comprimento (Figura 55-c). Na extremidade deste conduíte foi fixada uma chapa metálica de interface entre o elemento conduíte e o tubo geotêxtil (Figura 55-d). Na extremidade do cabo do encoder linear, também foi fixada uma chapa metálica de interface entre o tubo geotêxtil e o cabo do equipamento (Figura 55-e). O segmento formado (Figura 55-f) entre as chapas metálicas foi considerado segmento de interesse de medida, e a distância do mesmo, condição inicial antes do enchimento dos tubos geotêxtis (Figura 55-g).

Figura 54 – Funcionamento dos encoders.



Fonte: Posital Fraba (2020).

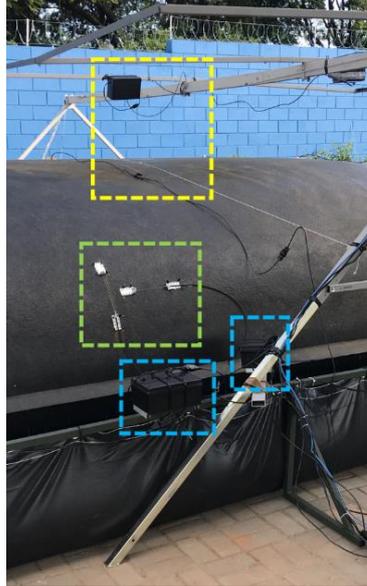
Figura 55 – Instalação dos encoders.



Fonte: imagem fornecida pela empresa Geospace.

O uso da tecnologia aplicada ao monitoramento de tubos geotêxteis foi desenvolvido pela empresa Geospace, que executou as leituras em campo e forneceu, em formato Excel, os dados das distâncias medidas nos três pontos ao longo do tempo. Uma das vantagens deste tipo de equipamento é a medida exata da circunferência ocorrida no segmento de interesse. Conforme pode ser visto na Figura 56 em verde, a deformação circunferencial é obtida pelo deslocamento do cabo, sendo que suas duas extremidades estão costuradas ao tubo geotêxtil, possibilitando a medida exata das deformações independente da circunferência do tubo. As caixas contendo os equipamentos, em azul na Figura 56, foram fixadas ao pódio de apoio. Em amarelo, também na Figura 56, está localizado o encoder para leitura de altura.

Figura 56 – Posicionamento dos encoders no tubo geotêxtil.



Fonte: a autora.

### 3.6.5 Sensor de ultrassom

Utilizado para medir a altura do tubo geotêxtil durante os ciclos de enchimento e desague.

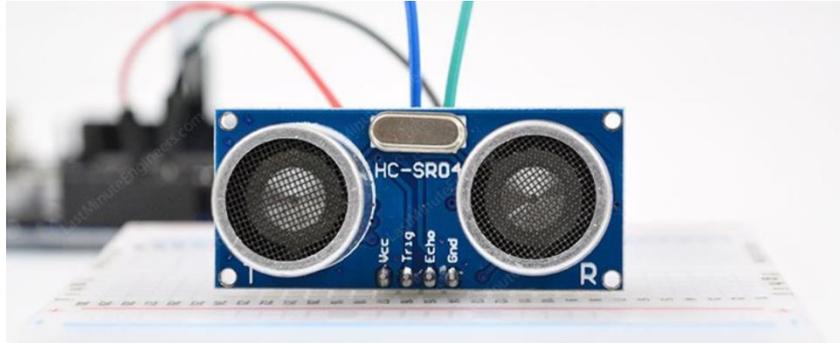
O ultrassom é uma onda sonora aguda com frequência maior que o limite audível da audição humana. O sensor de distância ultrassônico consiste em dois transdutores que possibilitam a medida de distância através da correlação com o tempo de percurso de uma onda ultrassônica entre um emissor e um receptor. O sensor, apresentado na Figura 57, é composto por um emissor que realiza a transmissão de pulsos de som ultrassônico de 40 KHz. Ao lado do mesmo é posicionado um receptor que captura os pulsos transmitidos pelo emissor. A distância do objeto de interesse, é diretamente relacionada com o tempo necessário para que a onda sonora vá até o objeto de interesse e seja refletida para o sensor.

O sensor é de pequenas dimensões e oferece a possibilidade de medida sem nenhum contato, entre 2 e 400 cm com precisão de 3 mm.

O modelo de sensor utilizado foi o HC-SR04 e o uso da tecnologia aplicada ao monitoramento de tubos geotêxteis foi desenvolvido pela empresa Geospace, que executou as leituras em campo e forneceu, em formato Excel, os dados das distâncias medidas ao longo do tempo.

Em campo, o sensor foi preso ao pórtico na região central e trabalhou em redundância com o encoder de deslocamento linear por cabo.

Figura 57 – Sensor ultrassom.



Fonte: Last Minute Engineers (2020).

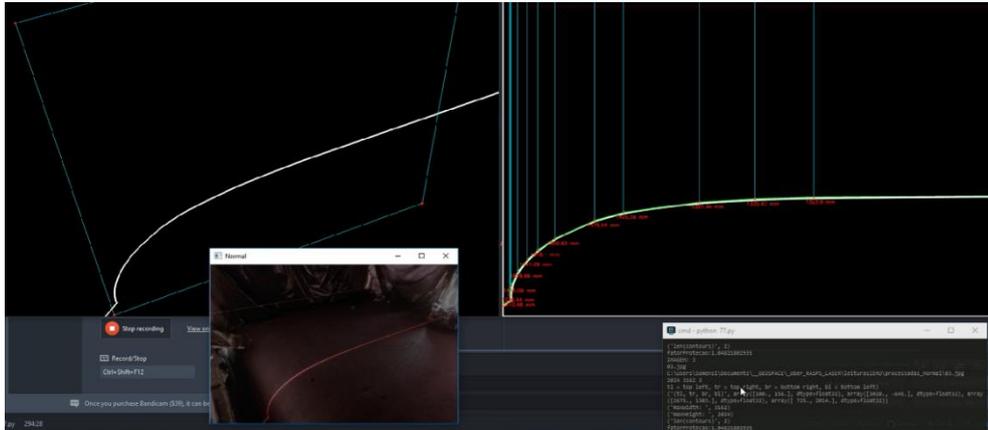
### 3.6.6 Rastreamento de laser em perspectiva - RLP

Utilizado para monitorar o formato dos tubos geotêxteis ao longo dos ciclos de enchimento e deságue.

A técnica RLP foi realizada através da instalação de equipamentos dentro da região do pórtico coberto, ao abrigo de luz. A técnica consiste em um emissor de laser, do tipo *laser line*, para criar uma linha iluminada sobre o tubo geotêxtil. Simultaneamente, é realizada a captura de imagens por uma câmera instalada, também no pórtico, e assim servir de entrada para um algoritmo de processamento de imagens. Este algoritmo possibilita a correção de perspectiva e o rastreamento dos pixels contendo a linha formada pelo laser, em vetores. Resultando após outros processos em um arquivo formato DWG contendo a linha laser em um plano 2D axial ao tubo geotêxtil. Este procedimento é ilustrado na Figura 58.

O uso da tecnologia aplicada ao monitoramento de tubos geotêxteis foi desenvolvido pela empresa Geospace, que executou as leituras em campo e forneceu, em formato DWG, as informações das seções transversais do tubo geotêxtil durante os ciclos de enchimento e drenagem.

Figura 58 – Processamento de imagem para transformação da linha a laser em formato DWG.



Fonte: imagem fornecida pela empresa Geospace.

### 3.6.7 Light Detection and Ranging - LIDAR

Utilizado para monitorar o formato dos tubos geotêxteis e a distância relativa entre marcações para medidas de deformação.

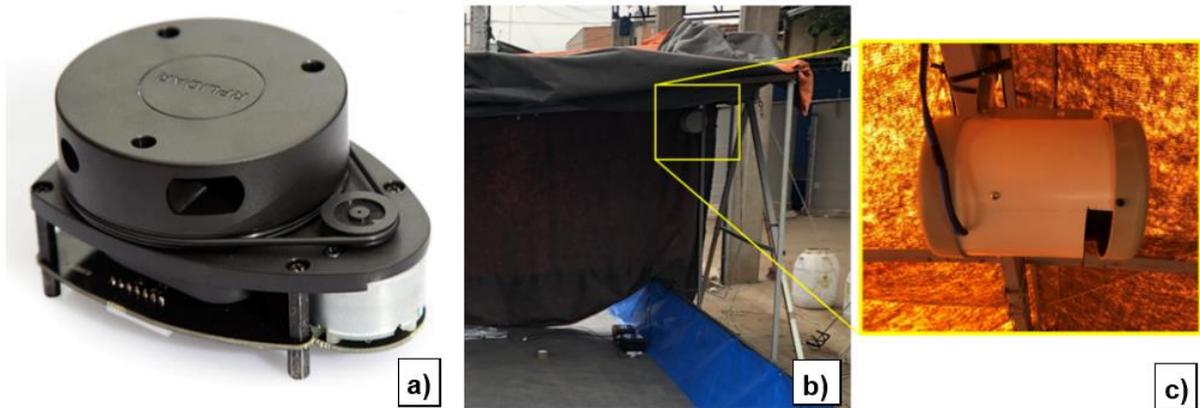
LIDAR é uma tecnologia óptica de detecção remota que mede propriedades da luz refletida de modo a obter a distância e/ou outra informação a respeito um determinado objeto distante.

O método mais utilizado para determinar a distância a um objeto é a utilização de laser pulsado. A distância a um objeto é determinada medindo a diferença de tempo entre a emissão de um pulso laser e a detecção do sinal refletido, de forma semelhante à tecnologia do radar, que utiliza ondas de rádio. A tecnologia LIDAR é aplicada no âmbito da geodesia, arqueologia, geografia, geologia, geomorfologia, sismologia, engenharia florestal, oceanografia costeira, detecção remota e física da atmosfera. O acrônimo LADAR (da sigla inglesa Laser Detection and Ranging) é utilizado predominantemente em contextos militares. O termo "radar laser" é também usado, no entanto a tecnologia LIDAR não utiliza ondas rádio ou microondas, que definem o termo radar.

O uso da tecnologia aplicada ao monitoramento de tubos geotêxteis foi desenvolvido pela empresa Geospace, que executou as leituras em campo e forneceu, em formato DWG, as informações das seções transversais do tubo geotêxtil durante os ciclos de enchimento e drenagem.

O equipamento (Figura 59-a) foi instalado no pórtico, acima do tubo geotêxtil (Figura 59-b), e estava protegido por uma carçaça feita com tubo de PVC, tendo apenas uma abertura do range de leitura (Figura 59-c).

Figura 59 – LIDAR. a) Equipamento b) Instalação c) Caraa.



Fonte: a autora.

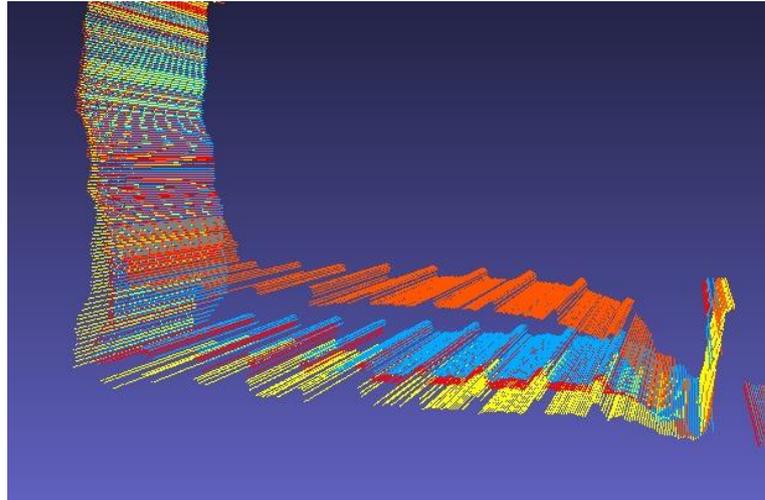
Na região de leitura do LIDAR, foram presos segmentos de tubos de PVC com abraçadeiras plásticas ou linhas de costura e fita (Figura 60), ao longo do tubo geotêxtil, de forma que ao realizar a leitura (Figura 61), as marcações pudessem ser identificadas e, além do formato, pudessem ser medidos os deslocamentos relativos entre as marcações.

Figura 60 – Tubos de PVC para referência nas leituras.



Fonte: a autora.

Figura 61 – Leituras do LIDAR captando as referências em tubo de PVC.



Fonte: imagem fornecida pela empresa Geospace.

### 3.7 ENSAIO SCR-S

O primeiro tubo geotêxtil instalado teve por objetivo ser preenchido com lodo sem adição de polímero flocculante.

O primeiro enchimento foi iniciado no dia 15 de maio de 2019 às 13:22, sendo o lodo proveniente da descarga para lavagem do Decantador 1. O bombeamento teve duração de 1h58min. O tubo geotêxtil encontrava-se vazio e foi enchido até a altura de 152,23 cm.

Durante toda a operação, buscou-se respeitar a altura máxima de enchimento indicada pelo fabricante (1,30m). Por inexperiência executiva, o SCR-S1 ultrapassou esta altura máxima, o que, nos demais enchimentos, foi corrigido, conseguindo-se uma variação entre -1,5cm e +2,9cm.

Este tubo geotêxtil teve ao todo, 4 ciclos de enchimento, sendo eles realizados às quartas-feiras, durante 4 semanas. A Tabela 17 indica os enchimentos realizados. Nota-se que, a cada ciclo, devido a quantidade de lodo retida no interior do tubo proveniente do enchimento anterior, os tempos de bombeamento foram sendo reduzidos. O tempo apresentado é contado ininterruptamente do momento em que a bomba foi ligada pela primeira vez, ao momento em que foi desligada pela última vez. A coluna “Paradas de bombeamento” apresenta os horários entre os quais, durante o bombeamento, a bomba foi desligada.

Tabela 17 – Ciclos de enchimento do SCR-S.

Ciclo	Data	Horário Início	Duração	Paradas de bombeamento	Altura inicial (cm)	Altura Final (cm)	Decantador
SCR-S1	15/05/2019	13:22	01h58min	13:35 às 13:52 13:58 às 14:25	0	152,23	1
SCR-S2	22/05/2019	09:57	50min	10:39 às 10:45	33,02	132,9	2
SCR-S3	29/05/2019	10:22	29min30s	10:48 às 10:49	44,86	128,5	3
SCR-S4	05/06/2019	09:47	26min30s	10:04 às 10:07	67,12	131,12	4

Fonte: a autora.

A Figura 62 mostra o esquema de enchimento, as informações obtidas previamente e os itens de monitoramento:

- o lodo proveniente do decantador foi caracterizado por Aparicio-Ardila (2020) como apresentado anteriormente;
- o teor de sólidos foi considerado com base em duas descargas monitoradas que serão apresentadas em “4 Resultados e análises”;
- todos os enchimentos foram realizados com a mesma bomba, a SPV EG-1000 e a vazão de entrada monitorada pelo medidor de vazão da ISOMAG. Através da curva da bomba e da vazão monitorada, foi possível inferir o ponto de funcionamento da bomba:
  - vazão média 960 l/min;
  - altura manométrica: 11 m.c.a.;
- o geotêxtil foi caracterizado por Aparicio-Ardila (2020) e os esforços de tração, neste primeiro tubo, foram medidos pelos encoders de deslocamento linear por cabo;
- o formato durante o enchimento foi monitorado pelo RLP;
- a altura de enchimento foi monitorada pelo encoder de deslocamento linear por cabo e pelo ultrassom;
- a vazão de saída do percolado foi calculada pela diferença entre o volume bombeado e o volume retido no interior do tubo geotêxtil, pelas Equações 18 e 19:

$$\text{Volume percolado} = \text{Volume entrada} - \text{Volume retido no tubo geotêxtil} \quad (18)$$

$$\text{Vazão percolado} = \text{Vazão de entrada} - \frac{\Delta \text{Volume retido no tubo geotêxtil}}{\text{tempo}} \quad (19)$$

A evolução do teor de sólidos foi acompanhada pela coleta de amostras que será apresentada a seguir.

Durante os enchimentos ocorreram imprevistos que impediram o uso de alguns equipamentos desde o primeiro ciclo de enchimento e, também, que impossibilitaram o uso de outros: o medidor de vazão só pode ser instalado a partir SCR-S2, o monitoramento do formato por rastreamento de laser em perspectiva, apenas a partir do SCR-S3. As leituras da altura do tubo geotêxtil ao longo do tempo foram realizadas pelo encoder instalado na posição vertical durante todos os enchimentos e pelo ultrassom a partir do segundo enchimento. Ocorreu que, após o primeiro enchimento, verificou-se uma rotação no tubo geotêxtil que, conseqüentemente, rotacionou o encoder. A partir de então, para o segundo enchimento, adotou-se as leituras do ultrassom, que não precisa estar preso ao tubo e não sofre interferência de pequenas torções.

O encoder foi mantido até o fim dos enchimentos pois, após a instalação do ultrassom, notou-se que as alturas as medidas de altura apresentam incertezas, havendo uma variação. É possível entender os dados a serem descartados e os dados a serem mantidos, pela tendência de valores apresentados pelo encoder. Também é importante frisar que muitas leituras tinham a precisam de 1 centímetro e não de 3 mm como indicava o equipamento. A Tabela 18 resume o momento de instalação dos equipamentos ao longo do ensaio.

Para instalação do ultrassom e algumas manutenções dos encoders, há uma ausência de dados com duração de 2 dias. Nessa ausência, a medida da altura variou de 38 cm no encoder para 33,02 cm no ultrassom. Para efeito do tratamento de dados, considerando maior confiabilidade do ultrassom, considerou-se que essa variação foi dada por desaguamento do lodo e a partir de então as alturas consideradas foram todas adquiridas pelo ultrassom, pois este traz maior confiabilidade por ser equipamento de medida absoluta, enquanto os encoders, são de medida relativa.

A técnica RPL foi calibrada com base nas leituras de altura do ultrassom. Os equipamentos encoders, sensor ultrassom e RPL, possuíam o mesmo sistema de aquisição, portanto, estavam sincronizados temporalmente.

Outra observação importante é a de que havia uma defasagem de tempo entre as leituras de altura e vazão, pois eram obtidas por sistemas independentes. Como a máxima altura de enchimento deve coincidir com o momento de parada da bomba e como também se observam patamares no volume quando há parada de

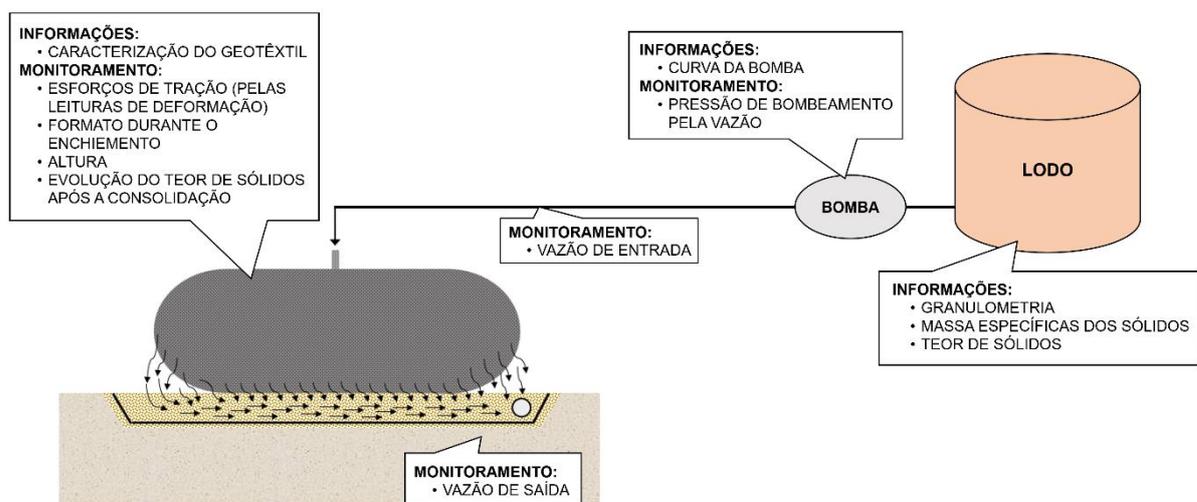
bombeamento e patamares na variação de altura, a coincidência destes momentos fez ser possível o ajuste temporal.

A coleta de dados do medidor de vazão foi realizada a cada 1 minuto, sendo o dado referente a vazão instantânea. O cálculo do volume bombeado foi realizado multiplicando-se esta vazão pelo tempo 1 minuto. Este equipamento só foi instalado a partir do SCR-S2 e para o SCR-S1 foi adotada nas análises, com base nas vazões dos demais enchimentos, a vazão constante de 16 l/s.

Não foi anotada a distância inicial dos cursores dos encoders. Sem esta informação, não era possível realizar o cálculo de deformação, que é uma medida relativa. Em 22 de maio de 2019, antes do segundo enchimento do primeiro tubo, foi realizada a leitura dessa distância. Como no instante da leitura, o encoder marcava 23,23 mm e a leitura realizada foi de 221,24 mm, chegou-se à conclusão de que a leitura inicial ( $L_0$ ) que deveria ter sido feita seria de 198,01 mm. A partir dessa distância  $L_0$  e com os deslocamentos marcados pelos encoders, foi possível encontrar as deformações.

Notou-se que o fio do encoder não acompanhou perfeitamente a curvatura do tubo geotêxtil durante o enchimento, mas ao ser iniciado o tratamento dos dados para essa correção, viu-se que ela seria inferior a precisão das leituras. Dessa forma, os dados não foram corrigidos.

Figura 62 – Esquema de enchimento, informações obtidas previamente e itens de monitoramento – SCR-S.



Fonte: a autora.

Tabela 18 – Momento de instalação dos equipamentos ao longo do SCR-S.

Enchimento		SCR-S1	SCR-S2	SCR-S3	SCR-S4
Equipamentos	Bomba submersível	X	X	X	X
	Medidor de vazão		X	X	X
	Encoder de deslocamento linear por cabo	X	X	X	X
	Sensor de ultrassom		X	X	X
	Laser em perspectiva – RLP			X	X

Fonte: a autora.

### 3.8 ENSAIO SCR-C

O segundo tubo geotêxtil instalado teve por objetivo ser preenchido com lodo com adição de polímero floculante.

O primeiro enchimento foi iniciado no dia 09 de outubro de 2019 às 14:52, sendo o lodo proveniente da descarga para lavagem do Decantador 4. O bombeamento teve duração de 1 h. O tubo geotêxtil encontrava-se vazio e foi enchido até uma altura de 14 cm.

Os dois primeiros enchimentos não levaram o tubo a sua capacidade máxima de enchimento. Isso ocorreu, devido ao fato de, por equívocos da equipe de suporte, a bomba instalada no poço não era a selecionada para o enchimento (bomba EG-1000), e esta possuía vazão de bombeamento muito inferior a necessária, sendo de 3 l/s. Assim, como a operação de descarga do decantador possui um tempo máximo de duração, não foi possível estender o enchimento, para não prejudicar a operação da ETA. Quando percebido o equívoco, antes do terceiro enchimento, a bomba foi trocada, e os ciclos passaram a atingir a capacidade máxima.

Este tubo geotêxtil teve ao todo, 5 ciclos de enchimento, sendo eles realizados às quartas-feiras, durante 5 semanas. A Tabela 19 indica os enchimentos realizados, seguindo o mesmo padrão da Tabela 17.

Durante toda a operação, buscou-se respeitar a altura máxima de enchimento indicada pelo fabricante (1,30m). Considerando a inexperiência executiva, os enchimentos SCR-C3 e SCR-4 mantiveram-se próximos ao objetivo, atingindo, respectivamente, 2 e 3 cm a mais. Para o SCR-C5, infelizmente, ultrapassou-se a altura máxima recomendada em 7 cm. As alturas apresentadas foram obtidas através do sensor de ultrassom.

Tabela 19 – Ciclos de enchimento do SCR-C.

Ciclo	Data	Horário Início	Duração	Paradas de bombeamento	Altura inicial (cm)	Altura Final (cm)	Decantador
SCR-C1	09/10/2019	14:52	58min	15:23 – 15:24	0	14	4
SCR-C2	16/10/2019	08:33	3h37min	-	0	59	1
SCR-C3	23/10/2019	09:04	1h23min	09:50 – 10:09	22	132	2
SCR-C4	30/10/2019	09:20	1h03min	09:48 – 10:03	37	133	3
SCR-C5	06/11/2019	08:27	34min	-	57	137	4

Fonte: a autora.

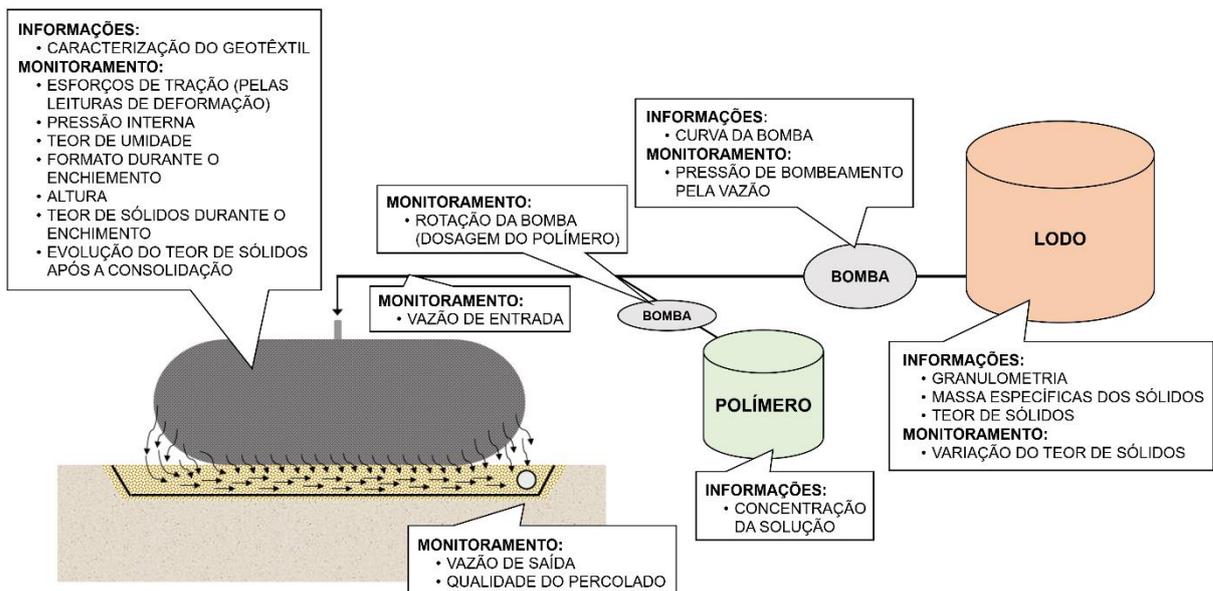
A Figura 63 mostra o esquema de enchimento, as informações obtidas previamente e os itens de monitoramento:

- o lodo proveniente do decantador foi caracterizado por Aparicio-Ardila (2020) como apresentado anteriormente;
- o teor de sólidos foi monitorado por tomadas de amostra a cada 15min, nas quais também foi verificada a floculação. As amostras foram coletadas em triplicata para obtenção do valor médio;
- os dois primeiros enchimentos foram realizados com uma bomba de vazão média de 3 l/s. Os demais enchimentos foram realizados com a bomba a SPV EG-1000 e a vazão de entrada monitorada pelo medidor de vazão da ISOMAG. Através da curva da bomba e da vazão monitorada, foi possível inferir a pressão de bombeamento, que se manteve do SCR-S;
- o geotêxtil foi caracterizado por Aparicio-Ardila (2020) e os esforços de tração, neste segundo tubo, foram medidos pelos encoders de deslocamento linear por cabo e através dos deslocamentos entre as marcações monitoradas pelo LIDAR;
- o formato durante o enchimento foi monitorado pelo LIDAR;
- a altura de enchimento foi monitorada pelo ultrassom e pelo LIDAR;
- a vazão de saída do percolado foi calculada pela diferença entre o volume bombeado e o volume retido no interior do tubo geotêxtil, conforme Equações 18 e 19;
- foram coletadas amostras e realizados ensaios de turbidez do percolado aos 5 min, 25 min, 1 h e a cada meia hora após 1 h de duração do enchimento. As análises foram realizadas em triplicata para obtenção do valor médio;

- a evolução do teor de sólidos foi acompanhada pela coleta de amostras seguindo o mesmo protocolo do primeiro tubo geotêxtil.

A Tabela 20 resume o momento de instalação dos equipamentos ao longo do ensaio. A coleta de dados do medidor de vazão foi realizada a cada 1 minuto, sendo o dado referente a vazão instantânea. O cálculo do volume bombeado foi realizado multiplicando-se esta vazão pelo tempo 1 minuto.

Figura 63 – Esquema de enchimento, informações obtidas previamente e itens de monitoramento – SCR-C.



Fonte: a autora.

Tabela 20 – Momento de instalação dos equipamentos ao longo do ensaio.

	Enchimento	SCR-C1	SCR-C2	SCR-C3	SCR-C4	SCR-C5
Equipamentos	Bomba com vazão de 3 l/s	X	X			
	Bomba submersível			X	X	X
	Medidor de vazão	X	X	X	X	X
	Encoder de deslocamento linear por cabo	X	X	X	X	X
	Sensor de ultrassom	X	X	X	X	X
	LIDAR	X	X	X	X	X

Fonte: a autora.

O sensor de ultrassom e os encoders de deslocamento possuem o mesmo sistema de aquisição de dados e, portanto, estão sincronizados temporalmente e possuíam uma tabela de resultados mais detalhadas. Com isso, para as análises hidráulicas, optou-se por utilizar como fonte de dados os dados do ultrassom e

sincronizá-los com os dados de vazão obtidos pelo medidor, no mesmo processo realizado para o SCR-S.

As informações coletadas com o LIDAR foram obtidas de forma independente e sua sincronização temporal com os demais dados foi dificultada. Com isso, optou-se por, tanto nas análises de geometria da seção transversal, como nas análises mecânicas, tratar os dados do LIDAR como uma aquisição a parte, sem escala temporal. O leitor irá encontrar, por exemplo, nas análises mecânicas, duas descrições de alturas separadas: uma para o encoder (sincronizado com o ultrassom) e outra para o LIDAR, que inclusive obteve leituras diferentes (normalmente inferiores) em relação à altura lida pelo ultrassom. Os valores inferiores encontrados pelo LIDAR são justificados pelo intervalo de aquisições: como este era de 5 min, não foi possível que a captura fosse realizada no momento exato da altura máxima, como foi feito pelo ultrassom, que realizou medidas a cada 1 min.

O processo de dosagem do polímero foi muito impreciso e difícil de ser monitorado e acompanhado. Devido à ausência de um tanque de equalização, o teor de sólidos variava de acordo com o momento da descarga e conseqüentemente, a dosagem ótima do polímero.

Aparicio-Ardila (2020) havia chegado à conclusão de que a concentração ideal seria de 2 mg de polímero para cada grama de sólidos totais do lodo. Estimando que o lodo possuía em média 40 gST/litro (este tubo geotêxtil foi preenchido em outubro, quando já havia iniciado a época das chuvas e conseqüente aumento do teor de sólidos), foram preparados 900 litros de solução com 3,5 kg de polímero.

Entretanto, a bomba não pode bombear esta solução devido a sua alta viscosidade. Foi optado então por diluir parte desta solução em  $\frac{2}{5}$  da solução +  $\frac{3}{5}$  de água, obtendo-se a mesma concentração de polímero (1,6 g de polímero para 1 l de água) que a equipe da ETA estava habituada a utilizar no tratamento do lodo proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (mesma equipe técnica responsável pelas duas unidades).

Para o primeiro enchimento, foi injetado na tubulação através da bomba dosadora 1 l de solução a cada 1,5 min. Na semana seguinte, para o segundo ciclo de enchimento, a solução de polímero que restou do primeiro enchimento na concentração de 3,5 kg de polímero para 900 l de água estava degradada e não apresentava mais a mesma viscosidade. Mesmo assim, optou-se por injetar na tubulação esta solução através da bomba dosadora com 1 l de solução a cada 1,5 min

e uma hora antes do término do enchimento, gotejou-se adicionalmente diretamente no poço a solução, para que não restasse solução degradada para uso na próxima semana.

A partir do terceiro enchimento, como explicado anteriormente, foi instalada a bomba submersível de recalque SPV EG-1000. Devido a sua vazão média de 16 l/s, não foi possível mais dosar com a bomba dosadora de polímero, pois sua vazão era insuficiente para vazão de lodo. Foi optado por todos os dias, algumas horas antes do enchimento, preparar a solução polimérica na concentração de 1,6 g de polímero para 1 l de água em quantidade suficiente apenas para aquele experimento e gotejar diretamente no poço. A regulagem da vazão de gotejamento era feita manualmente e com base na flocculação a olho: quando se notava que o lodo engrossava e conseqüentemente aumentava o teor de sólidos, aumentava-se o gotejamento; quando o lodo se tornava mais rarefeito, reduzia-se o gotejamento. Não se conseguiu atingir a flocculação na maior parte dos enchimentos quatro e cinco.

### 3.9 PROTOCOLO DE COLETA DE AMOSTRAS NA FASE DE CONSOLIDAÇÃO

Foram realizadas coletas semanais de amostras de lodo na fase de consolidação. Eram abertas pequenas janelas na parte superior do tubo geotêxtil (Figura 64) e com auxílio de frações de tubos de PVC (Figura 65), que eram cravados no lodo, foi possível obter uma amostra de cada região (CA, CE, BL e BT) de um quadrante (Q1 a Q4) em cada dia de coleta (Figura 66). Por exemplo: na primeira coleta obtiveram-se amostras das regiões CA, CE, BL e BT do Q1, na segunda coleta, das regiões CA, CE, BL e BT do Q2 e assim por diante. Essa distribuição foi determinada de forma que se pudessem coletar amostras representativas de regiões equidistantes, sem, entretanto, sofrer influência das áreas abertas nas coletas anteriores. De cada amostra, foram preparados 3 corpos de prova para que o teor de sólidos fosse o valor médio destes. As primeiras coletas foram realizadas apenas na região CE pelo bocal, pois o lodo ainda se apresentava muito líquido e poderia escoar se abertas as janelas. Assim que o lodo se tornou mais denso, seguiu-se o protocolo.

Figura 64 – Janelas abertas para coleta de amostras.



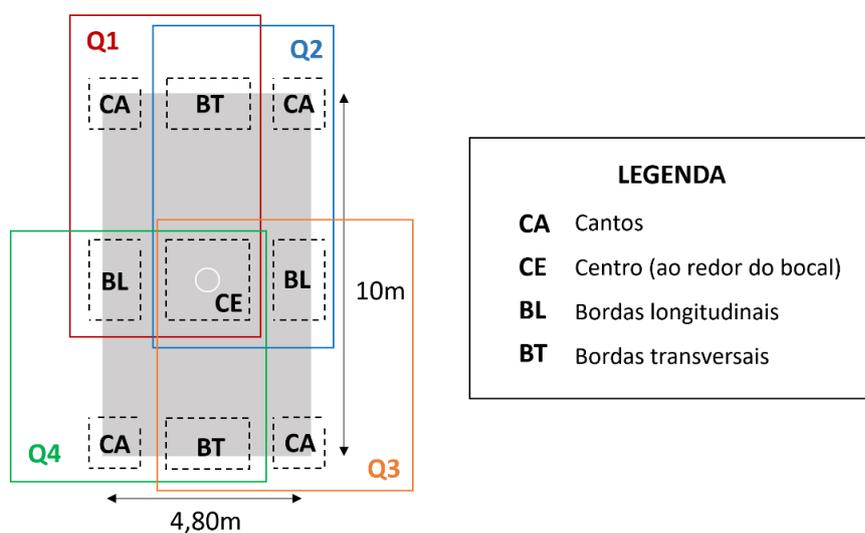
Fonte: a autora.

Figura 65 – Materiais utilizados para coleta de amostras.



Fonte: a autora.

Figura 66 – Localização dos quadrantes e regiões para coleta de amostras.

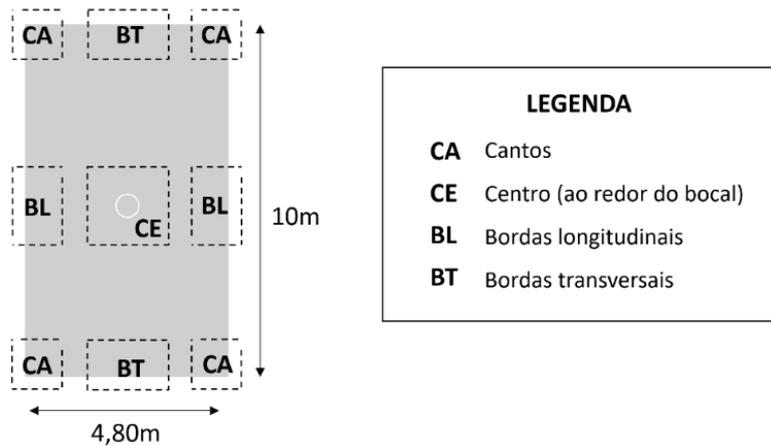


Fonte: a autora.

### 3.10 PROTOCOLA DE COLETA DE AMOSTRAS DO GEOTÊXTIL DEGRADADO

Após o término de todos os ensaios, antes do envio dos tubos geotêxteis para o aterro sanitário, foram coletadas amostras de diferentes regiões do tubo (parte superior, inferior, lateral), para realização de ensaios de tração e permeabilidade. A localização das amostras está indicada na Figura 67.

Figura 67 – Localização dos pontos de coleta de amostras.



Fonte: a autora.

### 3.11 METODOLOGIAS PARA TRATAMENTO DOS DADOS

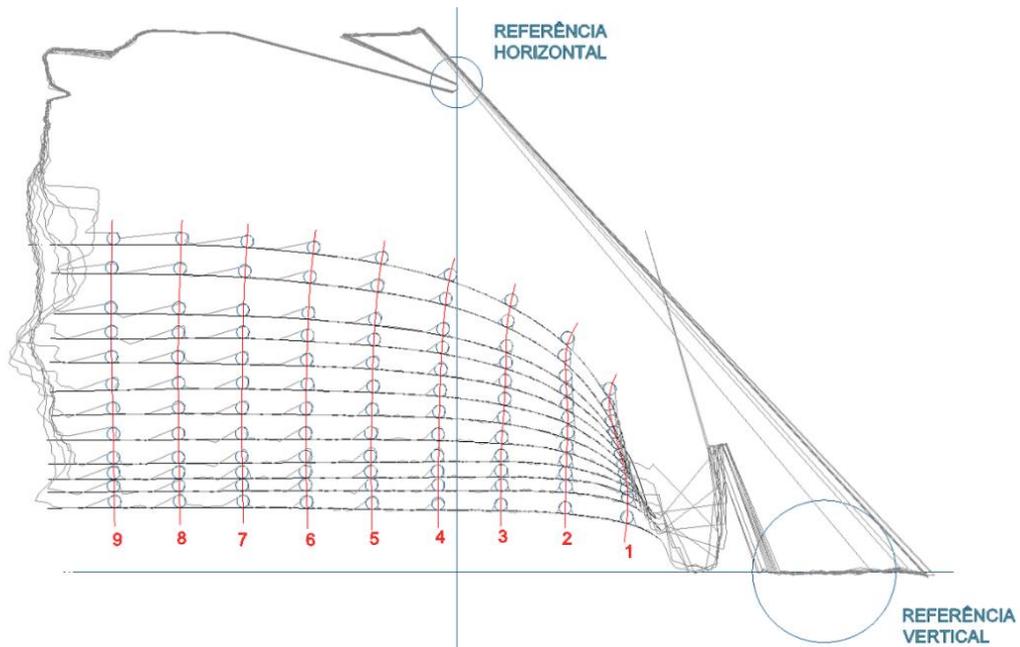
#### 3.11.1 Pontos de referência para dados do LIDAR

A Figura 68 mostra as imagens obtidas para um quarto de seção (metade da parte superior do SCR-C) através do LIDAR, onde:

- em cinza claro temos os traçados obtidos pelo rastreamento e em cinza escuro, a curva aproximada para a circunferência do tubo geotêxtil a partir destas linhas;
- em azul, as referências adotadas para o tratamento de dados: o topo da cobertura como referência horizontal, o solo, como referência vertical e onde eram percebidas as protuberâncias nas leituras, foram encaixadas circunferências, representando os tubos de PVC, para referência da movimentação do SCR-C;
- em vermelho, a nomenclatura adotada para cada trecho entre tubos de PVC.

A Figura 68 é uma captura de tela destas curvas, que foram obtidas em formato DWG, permitindo encontrar com precisão cada ponto de interesse e obter suas coordenadas para tratamento de dados. Serão muito utilizadas nas análises mecânicas as variações das distâncias entre as referências de 1 a 9, denominadas trechos 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8 e 8-9.

Figura 68 – Pontos de referência para dados do LIDAR.



Fonte: a autora.

### 3.11.2 Obtenção da seção transversal – LIDAR e RPL

Para os dois equipamentos foi obtido o monitoramento de um quarto da seção transversal: o lado direito superior dos tubos, com referência em relação ao solo e a costura lateral. Encontrado o eixo de simetria, a obtenção do lado esquerdo superior foi obtida por espelhamento da seção. Após este procedimento, foi tomado como referência o eixo da costura para espelhamento no sentido vertical, impondo o solo como limite, obtendo assim, a seção completa. A Figura 69 identifica os eixos de espelhamento e a Figura 70, a limitação imposta à base. O uso do espelhamento para obtenção das seções transversais foi realizado para permitir as análises, sendo o espelhamento pelo eixo vertical das Figuras 69 e 70 um artifício usado também por Silva (2019) em suas análises. Assim, a altura de enchimento e a largura máxima do tubo são dados confiáveis. A largura de contato com a base, entretanto e o formato da seção na região próxima ao ponto de interrupção (em azul na Figura 70) serão analisados com cautela, sendo atentadas esses itens nas análises, já que o peso dos sólidos retidos nessa região, ao depositar, podem gerar um formato mais achatado, deformando o tubo. Como esta imprecisão é pontual, a magnitude desta deformação não interfere significativamente na análise volumétrica.

Figura 69 – Eixos de espelhamento de um quarto da seção monitorada para obtenção da seção transversal.

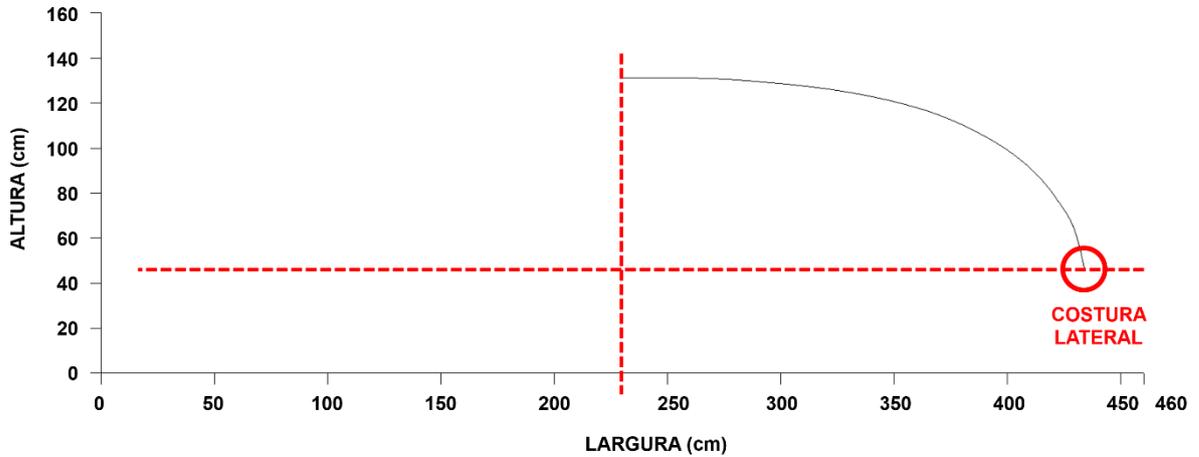
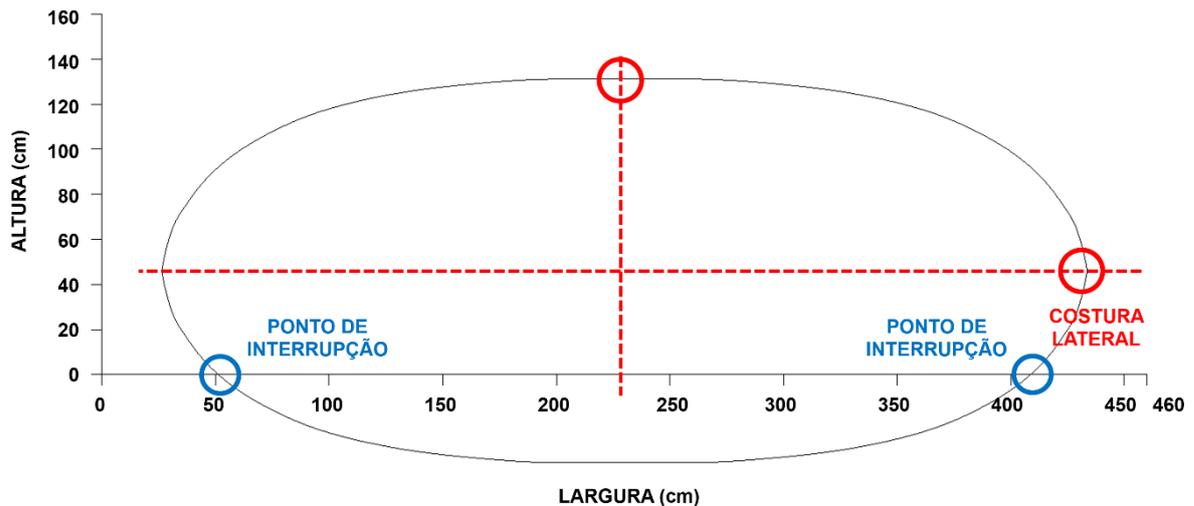


Figura 70 – Limitação imposta ao espelhamento pela base.



### 3.11.3 Obtenção do modelo 3D

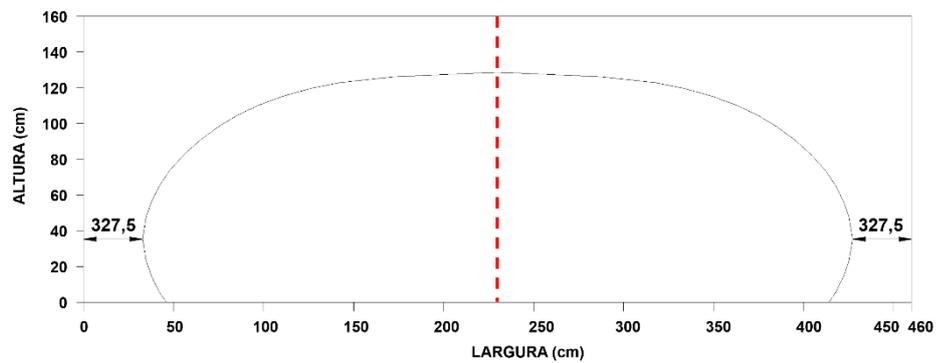
Com o objetivo de calcular o volume de armazenamento do tubo geotêxtil, o seguinte procedimento foi aplicado para 5 seções escolhidas de cada enchimento, visando transformá-las em um modelo 3D:

- a seção obtida é a transversal. Com o objetivo de obter a seção axial equivalente, foi medida a distância entre os pontos de maior largura da seção aos eixos "Y". Esta etapa está representada na Figura 71;
- essa distância foi mantida em relação as duas extremidades do gráfico com eixo "X" de tamanho 9,76 m (Figura 72);

- c) o formato dos cantos da seção transversal foi mantido e apenas o topo, na parte plana, foi estendido para fechar a seção (Figura 72);
- d) as duas seções foram multiplicadas pelo comprimento da seção oposta para se transformarem em um sólido e os dois sólidos foram intersectados, formando o tubo geotêxtil. Esta etapa está representada na Figura 73.

### Exemplo Etapa 1:

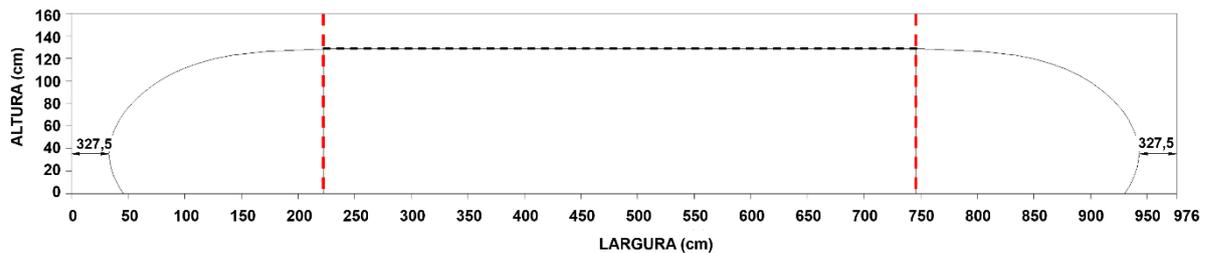
Figura 71 – Seção transversal: distância dos pontos de maior largura da seção aos eixos “Y”



Fonte: a autora.

### Exemplo Etapas 2 e 3:

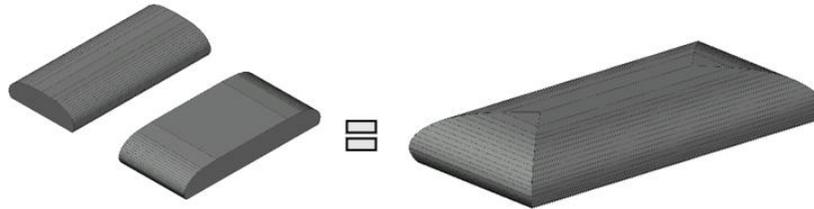
Figura 72 – Obtenção da seção axial.



Fonte: a autora.

#### Exemplo Etapa 4:

Figura 73 – Modelo 3D - etapas de obtenção do volume.



Fonte: a autora.

### 3.12 PRESSÃO DE BOMBEAMENTO NA ENTRADA DO TUBO GEOTÊXTIL

Para determinação da pressão de bombeamento, foi utilizada a seguinte metodologia: sendo conhecido o ponto de funcionamento da bomba, temos a altura manométrica desta e, calculando toda perda de carga até o material bombeado se localizar na entrada do tubo geotêxtil, é possível determinar a pressão na saída da tubulação, ou seja, a pressão de bombeamento na entrada do tubo geotêxtil.

Através da fórmula de “*Hazen-Williams*”, apresentada na Equação 20, e do “*Método dos comprimentos equivalentes*”, duas metodologias de dimensionamento hidráulico que podem ser encontradas em Porto (2006), podemos encontrar a perda de carga na tubulação:

$$J = 10,65 \times \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} \times D^{4,87}} \quad (20)$$

em que

- J é a perda de carga unitária (m/m);
- Q é a vazão (m<sup>3</sup>/s);
- C é o coeficiente de rugosidade, que depende da natureza e do estado das paredes do tubo e neste caso foi adotado o valor de 150 m<sup>0,367</sup>/s;
- D é o diâmetro da tubulação (m).

Conforme apresentado nos itens 3.7 e 3.8, para os enchimentos SCR-S1 a SCR-S4 e SCR-C3 a SCR-C5, foi utilizada uma bomba submersível modelo EG-1000 da marca SPV Hidrotécnica Brasileira LTDA.

As seguintes aproximações são destacadas para aplicação da metodologia:

- vazão constante de enchimento de 16 l/s;
- da Tabela 15, o ponto de funcionamento resulta em uma altura manométrica de 11 m;
- profundidade do poço = 2,20 m;
- altura máxima do tubo geotêxtil considerada = 1,35 m;
- para SCR-S1 a TG2-S4, considerado 20 m de tubulação flexível de 4 polegadas de PVC e os seguintes itens de 4 polegadas: 1 registro de gaveta, 1 tê de passagem direta (para representar o medidor de vazão ultrassônico) e 1 saída de canalização;
- para SCR-C3 a SCR-C5, considerado 20 m de tubulação flexível de 4 polegadas de PVC e os seguintes itens de 4 polegadas: 1 registro de gaveta, 1 tê de passagem direta (para representar o medidor de vazão ultrassônico), 2 tês de passagem direta (chicana), 12 joelhos de 90° (chicana) e 1 saída de canalização;
- peso específico do lodo bombeado = 9,93 kN/m<sup>3</sup>.

Aplicando os valores apresentados na Equação 20, temos:

$$J = 10,65 \times \frac{0,016^{1,85}}{150^{1,85} \times 0,100^{4,87}} = 0,035 \text{ m/m}$$

Para SCR-S1 a SCR-S4, todas as peças e o comprimento da tubulação resultam em um comprimento equivalente de 27,5 m, portanto, a perda de carga é de 0,96 m.

Para SCR-C3 a SCR-C5, todas as peças e o comprimento da tubulação resultam em um comprimento equivalente de 84,3m, portanto, a perda de carga é de 2,95 m.

Assim, o ponto de funcionamento da bomba, com altura manométrica de 11m, resultaria em uma pressão na saída da tubulação, ou seja, numa pressão de bombeamento na entrada do tubo geotêxtil de:

- SCR-S1 a TG2-S4: 11m – 2,20m – 1,35m – 0,96m = 6,49m x 9,93 kN/m<sup>3</sup> = 64,4 kPa
- SCR-C3 a SCR-C5: 11m – 2,20m – 1,35m – 2,95m = 4,5m x 9,93 kN/m<sup>3</sup> = 44,6 kPa

Estes resultados serão utilizados para discussão após a aplicação dos métodos de dimensionamento e obtenção dos parâmetros pressão hidrostática e pressão total interna ao tubo.

### 3.13 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PLAUT E SUHERMAN (1998) E GUO *ET AL.* (2014)

A aplicação dos métodos analíticos desenvolvidos por Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014) foi realizado utilizando os códigos de programação desenvolvidos por Silva (2019), tendo o autor desenvolvido um algoritmo numérico para aplicação de cada método. Com o auxílio do programa NotePAD++ e utilizando linguagens de programação Java e HTML, Silva (2019) desenvolveu códigos de programação que permitem inserir três parâmetros iniciais (perímetro do tubo, peso específico do material de enchimento e um adimensional referente à pressão de enchimento), e obter como resultados a forma do tubo geotêxtil e a tensão circunferencial.

### 3.14 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CANTRÉ E SAATHOFF (2011)

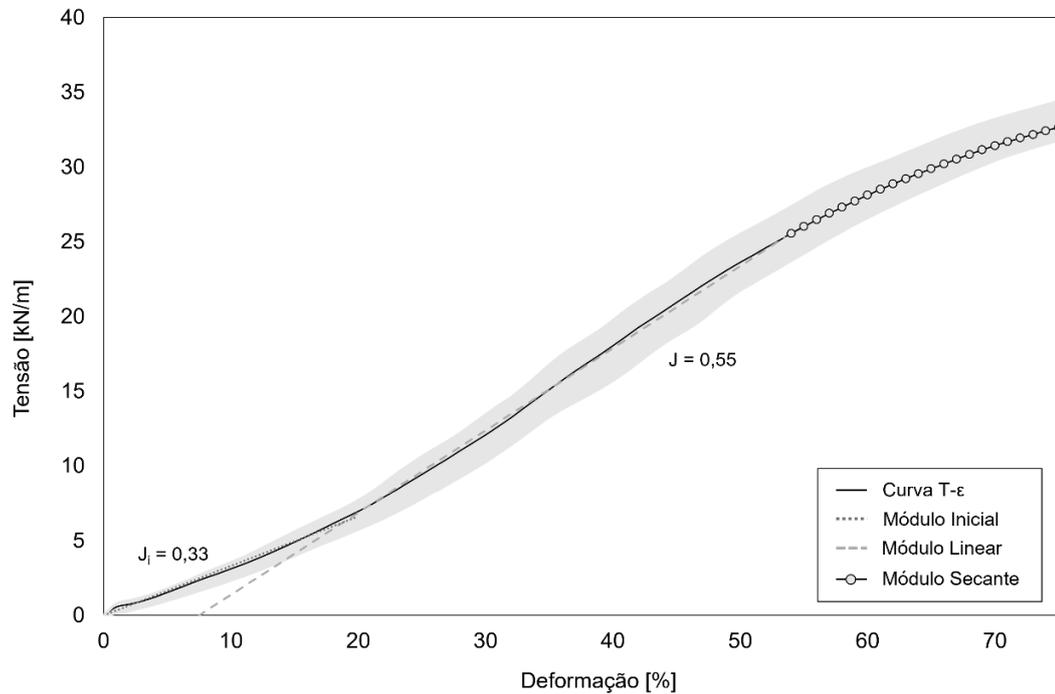
A aplicação prática do método proposto por Cantré e Saathoff (2011) para prever os valores máximos de deformação (e, portanto, de tensão) mobilizados no geotêxtil não tecido requer estimar os valores dos parâmetros do módulo de elasticidade e razão de Poisson.

Neste trabalho, para os tubos geotêxteis utilizados com 10 m de comprimento e perímetro e 9,2 m (razão de 1,1), foi adotada a hipótese do estabelecimento do estado plano de deformação.

#### 3.14.1 Módulo elástico

O módulo de elasticidade foi obtido a partir da curva tensão-deformação média (Figura 74) utilizando cinco corpos de prova de geotêxtil virgem cujo ponto de ruptura é apresentado na Tabela 5. Os resultados correspondem a direção transversal do geotêxtil. Na curva da Figura 74, foi identificada a região com módulo inicial ( $J_{in}=0,33$ ) e módulo elástico ( $J=0,55$ ).

Figura 74 – Curva média tensão-deformação para amostra virgem na direção transversal com módulo de elasticidade. A área sombreada representa os valores máximos e mínimos entre os cinco espécimes.



O método proposto por Cantré e Saathoff (2011) propõe que a cada nova iteração, o perímetro, que antes era constante, aumenta de comprimento devido à deformação. Essa deformação ( $\epsilon_i$ ), a partir da definição do estado de deformação plana, é calculada pela Equação 21, a partir da diferença entre a tensão circunferencial atual ( $T_i$ ) e a iteração anterior ( $T_{i-1}$ ).

$$\epsilon_i = \frac{T_i - T_{i-1}}{J(1-\nu^2)} \epsilon_i = \frac{T_i - T_{i-1}}{J(1-\nu^2)} \quad (21)$$

### 3.14.2 Razão de Poisson

Cantré e Saathoff (2011) usaram constante  $\nu$  e igual a 0,5 em sua análise de sensibilidade. Para este estudo,  $\nu$  foi calculado a cada nova iteração, utilizando a Equação 22, apresentada por Giroud (2004). Isso pode ser observado no gráfico da Figura 26. A deformação utilizada na Equação 22 ( $\epsilon_{tot,i}$ ) refere-se ao perímetro da iteração em relação ao perímetro inicial (Equação 23).

$$v_{i+1} = \frac{1}{\varepsilon_{tot,i}} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon_{tot,i}}} \right) \quad (22)$$

$$\varepsilon_{tot,i} = \frac{L_i - L_0}{L_0 - B_i} \quad (23)$$

### 3.14.3 Código de programação

Utilizando o software gratuito GNU Octave, foi desenvolvido um código de programação para o método analítico de Plaut e Suherman (1998). O código de programação obtém como resultados a forma do tubo geotêxtil e a tensão circunferencial (ver etapas de cálculo na Figura 24 – item 2.7.3) a partir de três parâmetros iniciais inseridos: perímetro do tubo ( $L$ ), peso específico do material de preenchimento ( $\gamma$ ) e altura ( $H$ ).

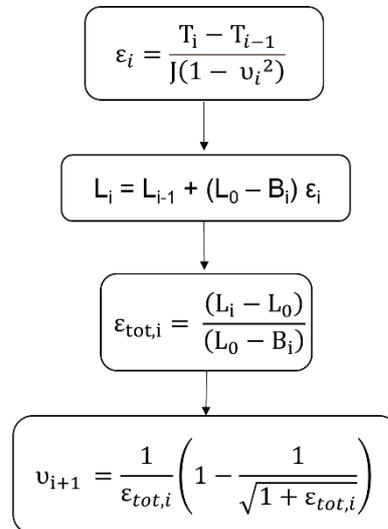
Para obter os resultados pelo método proposto por Cantré e Saathoff (2011), foram adicionados ao código de programação os seguintes passos: com tensão circunferencial ( $T_i$ ) e adotando para a primeira iteração  $T_0$  igual a zero, a deformação do geotêxtil ( $\varepsilon_i$ ) foi calculado a partir da Equação 21. O módulo de elasticidade a ser utilizado na Equação 21 deve ser definido como parâmetro de entrada. Para a primeira iteração, adotou-se  $v_1$  igual a 0,5.

De posse da deformação, calcula-se um novo comprimento para o perímetro ( $L_i$ ) através da Equação 24, onde  $B_i$  é a largura de contato com o solo, indicando que apenas o comprimento da seção que não está em contato com o solo é deformado.

$$L_i = L_{i-1} + (L_0 - B_i) \varepsilon_i \quad (24)$$

A deformação de  $L_i$  em relação a  $L_0$  é calculado usando a Equação 23 e o coeficiente de Poisson, pela Equação 22. Com o novo perímetro ( $L_i$ ), o código é reiniciado e a tensão circunferencial é recalculada ( $T_i$ ). O incremento da tensão adimensional ( $t$ ) entre duas iterações  $<10^{-5}$  é utilizado como critério de parada. O fluxograma da Figura 75 apresenta o procedimento de cálculo resumido na Figura 24 (item 2.7.3) como “Calcular as deformações e a novo perímetro da circunferência no estado plano de deformações  $L_i$ ”.

Figura 75 – Etapas de cálculo inseridas no código de programação do método de Cantré e Saathoff (2011) para obtenção das deformações e da nova circunferência no estado plano de deformações  $L_i$ .



Fonte: a autora.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados foram organizados em quatro grupos, sendo o primeiro para apresentação e discussão da geometria da seção transversal dos tubos, sendo analisadas as seções teóricas encontradas através das metodologias de dimensionamento selecionadas, as seções obtidas em campo e realizada uma análise comparativa entre estas. Com base nas seções transversais, pode-se fazer uma análise volumétrica dos tubos geotêxteis, que consiste no segundo grupo de resultados.

Os resultados do monitoramento realizado nos tubos pode ser dividido em hidráulico (terceiro grupo de resultados) e mecânico (quarto grupo). Os resultados do monitoramento hidráulico consistem em analisar o lodo de entrada, os ciclos de enchimento e deságue, a etapa de consolidação e a turbidez do percolado. Já o monitoramento mecânico, em analisar as deformações mobilizadas no geotêxtil, tanto através dos resultados de campo, como comparando-os com os resultados obtidos pelas metodologias de dimensionamento, a pressão de bombeamento e a degradação do geotêxtil.

### 4.1 GEOMETRIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL

#### 4.1.1 Seções teóricas

As metodologias de dimensionamento selecionadas, Plaut e Suherman (1998), Guo *et al.* (2014) e Cantré e Saathoff (2011), foram desenvolvidas para representar tubos geotêxteis preenchidos com ciclo único. Assim, apenas o primeiro enchimento de cada ensaio, SCR-S1 e SCR-C1 seriam possíveis de serem analisados através destas metodologias. Como para o SCR-C os dois primeiros ciclos atingiram alturas de enchimento muito baixas, com baixas solicitações ao geotêxtil, os dados foram excluídos desta análise, já que não foi possível obter dados coerentes tanto para as metodologias teóricas como nos monitoramentos em campo. Foi utilizado o SCR-C3, primeiro a atingir altura máxima de enchimento, a fim de permitir a realização das análises.

Silva (2019) desenvolveu códigos de programação que possuem como parâmetros de entrada o perímetro do tubo geotêxtil e o peso específico do material

bombeado, além de um adimensional de pressão, para obtenção dos parâmetros geométricos da seção transversal do tubo durante o enchimento através das metodologias de Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014).

A fim de utilizar estes códigos para análise dos SCR-S1 e SCR-C3, foram adotados como parâmetros de entrada os seguintes valores:

- os tubos geotêxteis instalados possuíam largura de 4,60 m e, portanto, perímetro ( $L$ ) de 9,20 m;
- nas análises de teor de sólidos que serão apresentadas no item 4.3.1 foram encontrados os seguintes pesos específicos para o lodo de entrada: 9,93 kN/m<sup>3</sup> para o SCR-S1 e 10,01 kN/m<sup>3</sup> para o SCR-C3, aplicados nas análises;
- o parâmetro “pressão” foi sendo inserido por tentativa e erro até o momento em que era encontrada como resposta a altura de enchimento desejada: para SCR-S1,  $H = 1,52\text{m}$  e para SCR-C3,  $H=1,31\text{m}$ .

A seção teórica obtida pela metodologia de Cantré e Saathoff (2011) foi calculada utilizando como parâmetros de entrada para o SCR-S1: perímetro inicial ( $L_0$ ) de 9,20 m, peso específico do lodo ( $\gamma$ ) de 9,93 kN /m<sup>3</sup> e altura máxima de enchimento ( $H$ ) de 1,52 m, razão de Poisson ( $\nu_1$ ) igual a 0,5 e recalculado pela Equação 22 a cada iteração com a deformação de  $L_i$  em relação a  $L_0$ . Duas análises foram realizadas, a primeira com módulo elástico  $J = J_{in} = 33$  kN/m e a segunda com  $J = 55$  kN/m.

Para o SCR-C3, foram utilizados como parâmetros de entrada: perímetro inicial ( $L_0$ ) de 9,20 m, peso específico do lodo ( $\gamma$ ) 10,01 kN /m<sup>3</sup>, altura máxima de enchimento ( $H$ ) de 1,31 m, razão de Poisson ( $\nu_1$ ) igual a 0,5 e recalculado pela Equação 22 a cada iteração com a deformação de  $L_i$  em relação a  $L_0$ . Duas análises foram realizadas, a primeira com módulo elástico  $J = J_{in} = 33$  kN/m e a segunda com  $J = 55$  kN/m.

As Tabelas 21 e 22 apresentam os parâmetros geométricos teóricos encontrados para as seções de altura máxima obtidas em campo para o SCR-S1 e SCR-C3 respectivamente. Para a metodologia de Guo *et al.* (2014), quando o parâmetro de entrada “pressão” é zero, ou seja, o tubo está em equilíbrio sendo solicitado apenas pela pressão hidrostática, a altura encontrada é de 1,46 m. Assim, através do código de Silva (2019), não é possível fazer análises através deste método

para altura de enchimento inferiores a 1,46 m. Para o SCR-C3, com altura de 1,31 m, a metodologia de Guo *et al.* (2014) não foi aplicada.

Tabela 21 – Parâmetros geométricos teóricos encontrados para H = 1,52 m para o SCR-S1.

Metodologia	B (m)	W (m)	A (m <sup>2</sup> )
Plaut e Suherman (1998)	2,95	3,84	4,97
Guo <i>et al.</i> (2014)	2,95	3,84	4,96
Cantré e Saathoff (2011) J <sub>in</sub> = 33 kN/m	3,82	4,67	6,12
Cantré e Saathoff (2011) J = 55 kN/m	3,49	4,35	5,66

Fonte: a autora.

Tabela 22 – Parâmetros geométricos teóricos encontrados H = 1,31 m para o SCR-C3.

Metodologia	B (m)	W (m)	A (m <sup>2</sup> )
Plaut e Suherman (1998)	3,22	3,94	4,47
Cantré e Saathoff (2011) J <sub>in</sub> = 33 kN/m	3,81	4,53	5,20
Cantré e Saathoff (2011) J = 55 kN/m	3,58	4,31	4,92

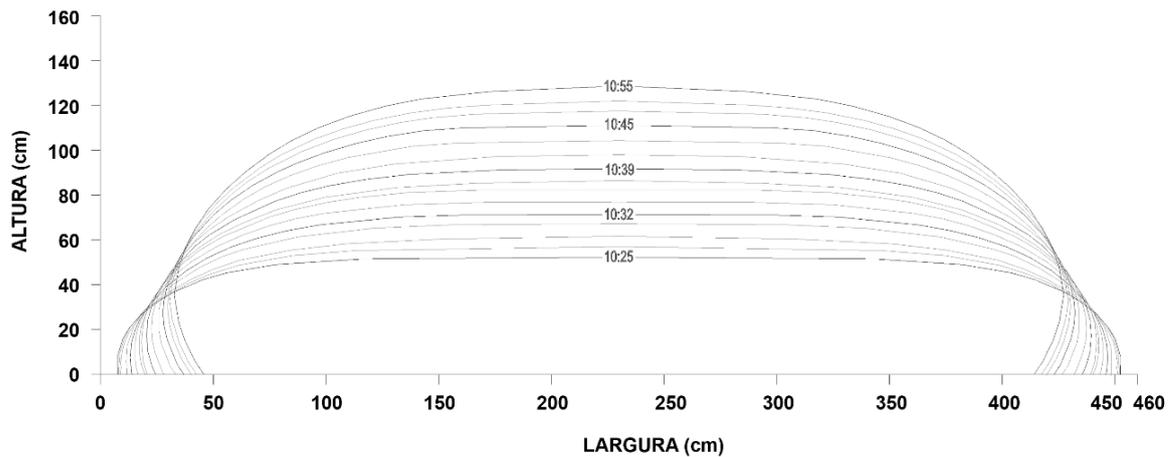
Fonte: a autora.

#### 4.1.2 Seções obtidas em campo

Serão apresentadas a seguir as seções obtidas em campo para os SCR-S3 e SCR-S4 através do RLP.

Para o SCR-S3, o enchimento foi iniciado as 10:22 do dia 29 de maio de 2019, com altura inicial de 44,68 cm. A Figura 76 mostra o desenvolvimento da seção transversal longo do tempo. As 10:55 a altura máxima de 128,50 cm foi atingida.

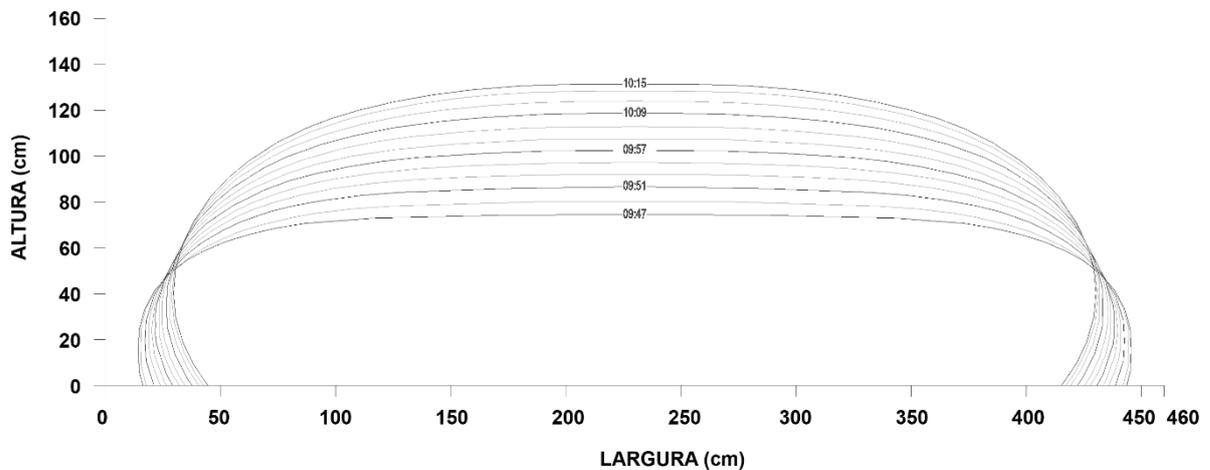
Figura 76 – Monitoramento da seção transversal SCR-S3.



Fonte: a autora.

Para o SCR-S4, o enchimento foi iniciado as 09:47 do dia 05 de junho de 2019, com altura inicial de 67,12 cm. A Figura 77 mostra o desenvolvimento da seção transversal longo do tempo. As 10:15 a altura máxima de 131,12 cm foi atingida.

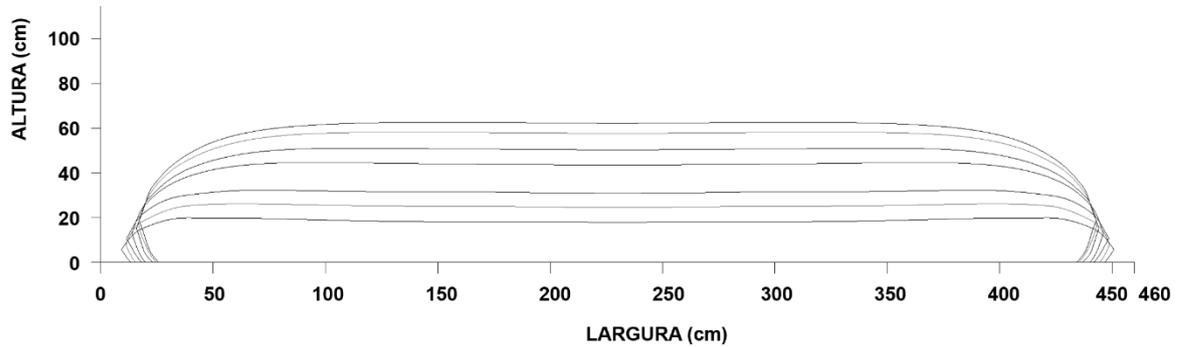
Figura 77 – Monitoramento da seção transversal SCR-S4.



Fonte: a autora.

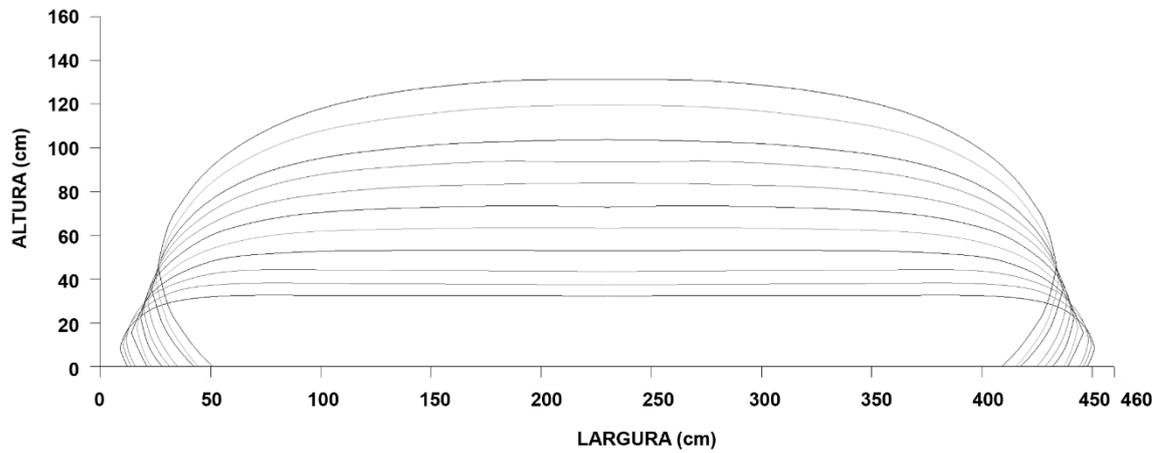
As Figuras 78 a 81 apresentam as seções obtidas em campo para os SCR-C2 a SCR-C5 através do LIDAR. Como explicado anteriormente, este equipamento teve sua aquisição de dados realizada de forma independente dos dados coletados com o enconder e não possui uma escala temporal precisa. Portanto, abaixo são apresentadas as seções ao longo do enchimento sem identificação temporal. O horário inicial e final de cada ensaio pode ser encontrado na Tabela 19.

Figura 78 – Monitoramento da seção transversal SCR-C2. Altura máxima atingida 62,1 cm.



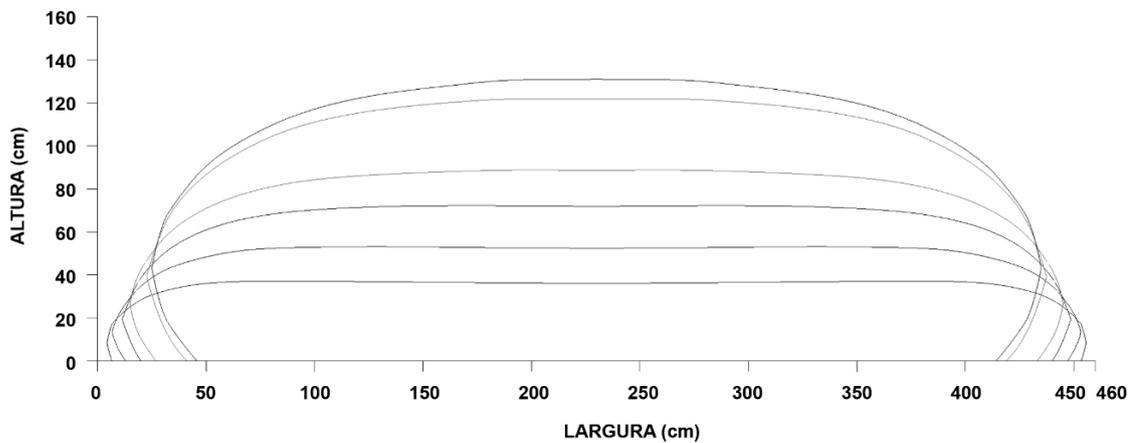
Fonte: a autora.

Figura 79 – Monitoramento da seção transversal SCR-C3. Altura máxima atingida 131,2 cm.



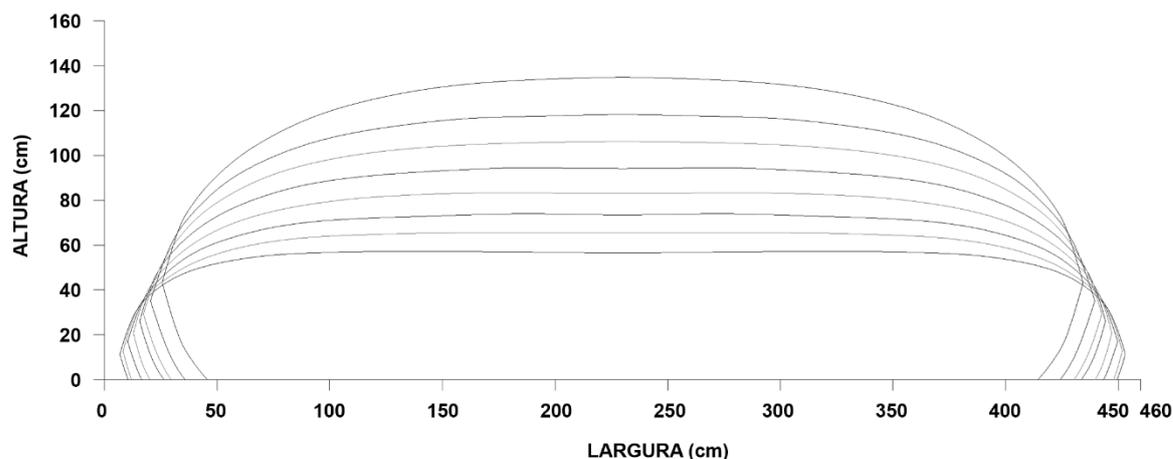
Fonte: a autora.

Figura 80 – Monitoramento da seção transversal SCR-C4. Altura máxima atingida 130,9 cm.



Fonte: a autora.

Figura 81 – Monitoramento da seção transversal SCR-C5. Altura máxima atingida 134,9cm.



Fonte: a autora.

A Tabela 23 apresenta a geometria da seção transversal máxima dos enchimentos SCR-C2, C3, C4 e C5, incluindo os comprimentos inicial ( $L_{in}$ ) e final ( $L_f$ ) de cada ciclo. O primeiro ciclo não pode ser observado devido à baixa altura alcançada.

Tabela 23 – Parâmetros geométricos para a seção transversal na altura máxima de cada enchimento obtidos pela tecnologia LIDAR para SCR-C.

	SCR-C2	SCR-C3	SCR-C4	SCR-C5
$L_{in}$ (m)	9,2	9,2	9,4	9,5
$L_f$ (m)	9,2	9,46	9,52	9,56
B (m)	4,09	3,58	3,68	3,69
H (m)	0,62	1,31	1,31	1,35
W (m)	4,26	4,08	4,10	4,09
A ( $m^2$ )	2,48	4,66	4,67	4,76

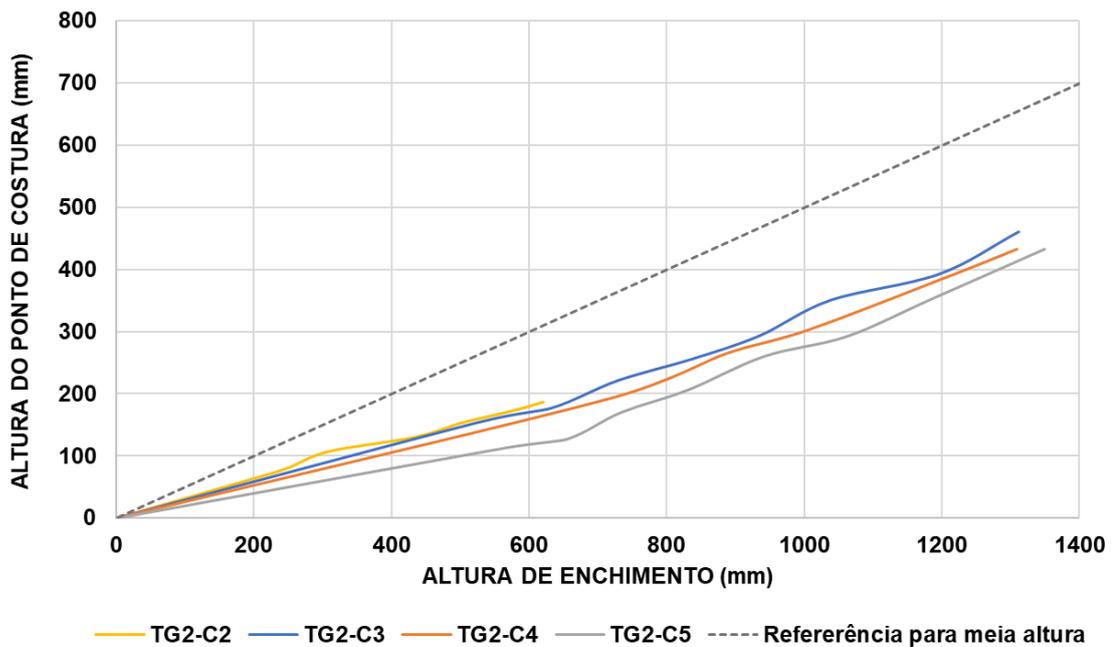
Fonte: a autora.

Nas análises das seções obtidas em AutoCad, antes de aplicado o refinamento dos pontos para apresentação das Figuras 78 a 81, era possível perceber que a medida W, maior largura do tubo geotêxtil, sempre é coincidente com a costura lateral, já que os tubos não sofreram rotação significativa durante os enchimentos. Com isso, foi possível analisar a trajetória deste ponto de costura em relação à altura de enchimento e está apresentado na Figura 82: foram coletadas as coordenadas Y do ponto de costura em algumas sessões de cada enchimento e estas foram plotados em um gráfico versus a altura do tubo naquele instante.

Se o tubo desenvolvesse um formato circular ou de falsa elipse ao longo do enchimento, com deformações uniformemente distribuídas, o ponto de costura estaria localizado à meia altura da seção, conforme representa a linha enchimento. Entretanto, é possível perceber que essa trajetória já se inicia no SCR-C2 abaixo da meia altura e a cada novo enchimento, ganha menores alturas.

Isto indica que o geotêxtil superior do tubo se deforma muito mais que o inferior para obtenção da seção máxima, o que é justificável pela quantidade de sólidos acumulados na região da base do tubo, que criam um esforço contra o ganho de altura.

Figura 82 – Altura do ponto de costura em relação à altura de enchimento para os SCR-C2 a SCR-C5.



Fonte: a autora.

#### 4.1.3 Comparação entre seções obtidas em campo e teóricas

Como a seção do enchimento SCR-S1 não foi monitorada, as análises comparativas entre a seção máxima obtida em campo e através das metodologias será realizada somente para o SCR-C3. Veja a Tabela 24.

Tabela 24 – Diferença percentual entre dados de campo e valores teóricos – SCR-C3.

	H	B	W	A
Plaut e Suherman (1998)	0	-10,1	-3,4	-4,1
Cantré e Saathoff (2011) $J_{in} = 33 \text{ kN/m}$	0	+ 6,4	+ 11,0	+ 11,6
Cantré e Saathoff (2011) $J = 55 \text{ kN/m}$	0	0	+ 5,6	+ 5,6

Fonte: a autora.

Os dados encontrados através da metodologia de Plaut e Suherman (1998) apresentam-se inferiores aos encontrados em campo. Esta divergência era esperada, já que o método não considera a deformação do material, resultando sempre em geometria com perímetro constante, o que não ocorre em campo. A maior diferença nos dados ocorreu para a largura de contato com a base (B). Esta diferença pode ter diferentes origens, como o fato de ter sido obtida pelo espelhamento da seção superior, o que acarreta imprecisões nesta região e, pela não consideração da deformação do material que acompanha a acomodação da parte inferior do tubo com a deposição da fração sólida.

O método de Cantré e Saathoff (2011), utilizando  $J_{in} = 33 \text{ kN/m}$ , foi o que apresentou maior divergência entre os resultados, indicando que a calibração dos parâmetros iniciais influencia diretamente nos resultados. Já a geometria encontrada para  $J = 55 \text{ kN/m}$  foi precisa para o parâmetro B e pouco maior para os parâmetros W e A.

É possível concluir que, como a variação do perímetro para o SCR-C3 foi de 26cm, ou seja, em torno de 3% do perímetro inicial, era esperado que as diferenças entre os dados de campo o método de Plaut e Suherman (1998), que não considera deformações, apresentassem a mesma ordem de grandeza. Para os demais ciclos, em que as deformações aumentam, ou para outras aplicações que impliquem em maiores deformações do material, a tendência é que o método se apresente cada vez mais divergente. Por outro lado, o método de Cantré e Saathoff (2011) mostrou que sua convergência depende do bom ajuste dos parâmetros de entrada para uma boa correlação dos dados.

As seções transversais obtidas pelo monitoramento em campo realizado por Silva (2017) mostram um formato mais próximo ao circular para as máximas alturas de enchimento, diferentemente do formato próximo a uma falsa elipse encontrado neste trabalho (mais achatado). Entretanto, ao analisar os resultados da retroanálise

de Silva (2019), entende-se que, tanto para as metodologias baseadas na teoria de membrana como na análise numérica, as seções transversais encontradas convergem com estes resultados, assim como neste trabalho. A diferença entre as pesquisas está na máxima altura de enchimento: por ser fabricado a partir de geotêxtil tecido, com maior resistência, os tubos de Silva (2017) suportavam maior pressão interna e conseqüente, maior altura de enchimento. Além da pressão hidrostática, houve um incremento de pressão de bombeamento em torno de 7 kPa.

Já neste estudo, todos os enchimentos, com exceção do SCR-S1, obtiveram alturas de enchimento correspondentes a pressões internas inferiores a pressão hidrostática de equilíbrio. Assim, as seções transversais deste trabalho seriam comparáveis as seções transversais ao longo do enchimento obtidas por Silva (2017), as quais apresentam formato achatado.

#### 4.2 ANÁLISES VOLUMÉTRICAS

Para os enchimentos SCR-S3 e SCR-S4 e SCR-C2 a SCR-C5, cujas seções transversais foram analisadas no item 4.1.2, foi realizado o procedimento apresentado no item 3.11.3 para obtenção do volume do tubo geotêxtil ao longo do enchimento. A Figura 83 mostra esquematicamente a evolução do enchimento obtida com os modelos 3D.

Figura 83 – Evolução do formato ao longo do enchimento.

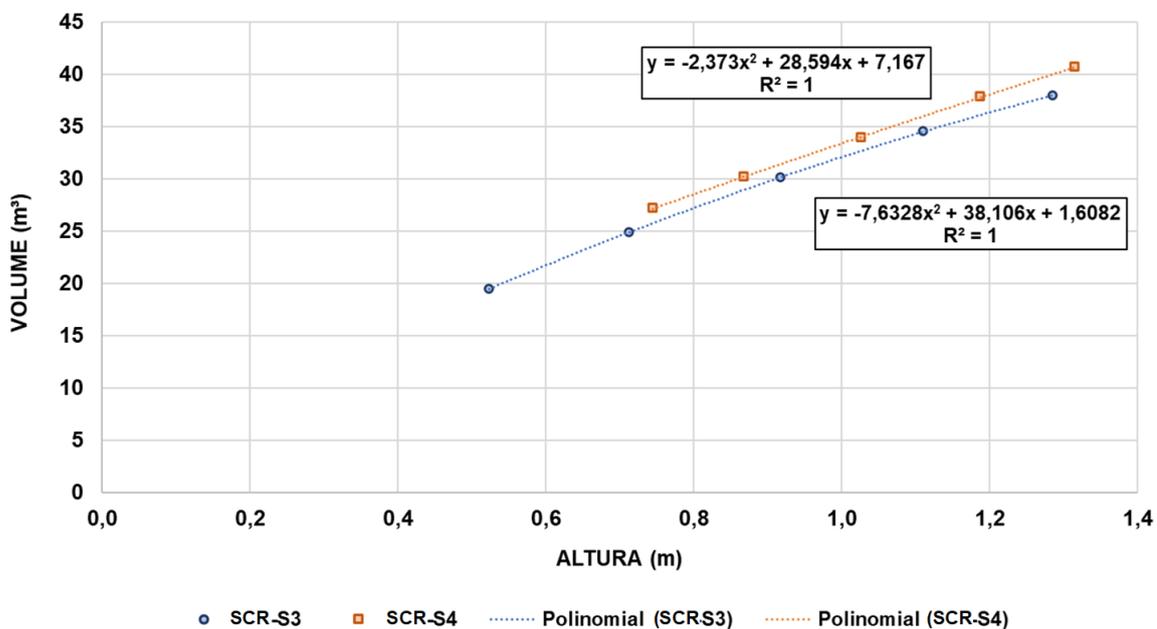


Fonte: a autora.

Foram, então, plotados os gráficos da altura de enchimento vs volume, Figuras 84 e 85 respectivamente para SCR-S e SCR-C e encontrada a equação que relaciona as duas informações.

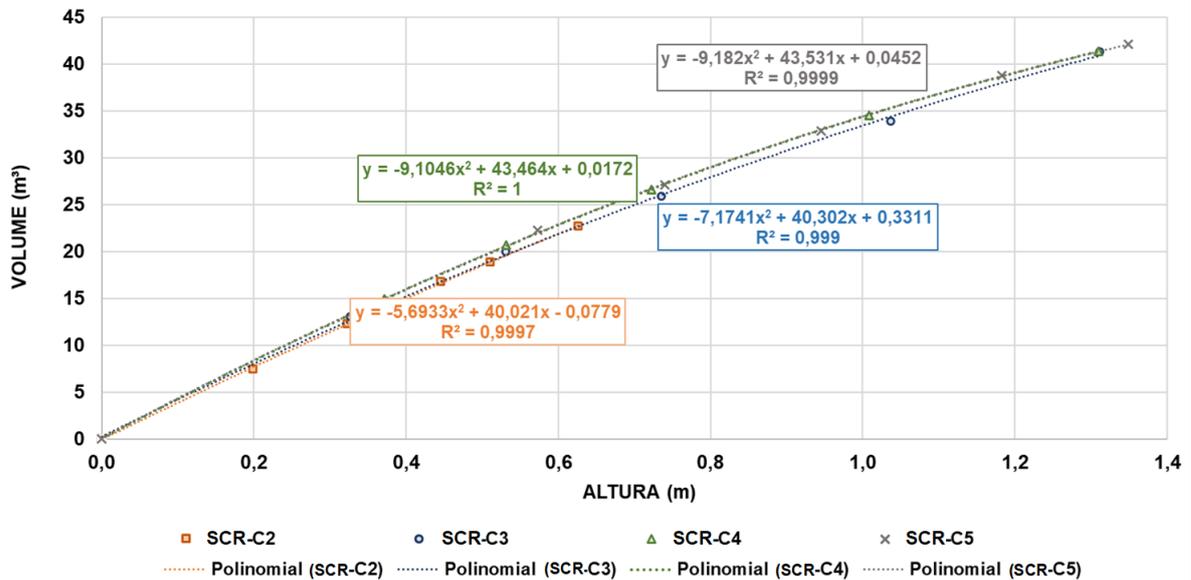
Para efeitos de correlação rápida, se pensarmos nas dimensões informadas pelo fabricante de 4,6 m de largura, 10 m de comprimento e 1,30 m de altura e fizermos o cálculo do volume de um paralelepípedo com estas dimensões, temos que os volumes encontrados para as seções máximas ficam em torno de 65 a 70% deste volume.

Figura 84 – Volume de armazenamento em relação à altura de enchimento para SCR-S3 e SCR-S4.



Fonte: a autora.

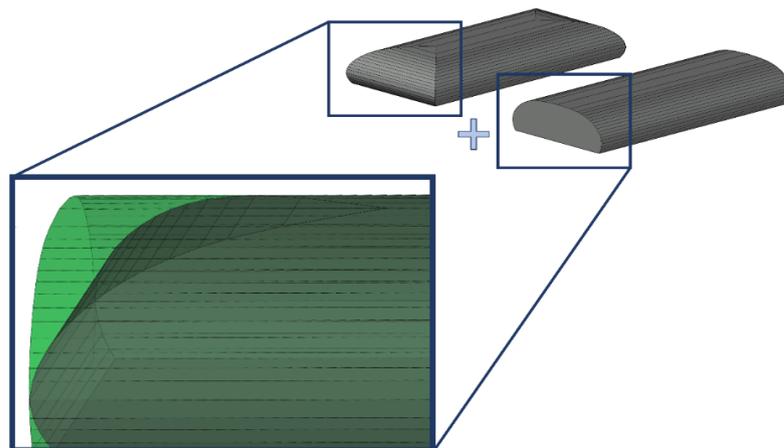
Figura 85 – Volume de armazenamento em relação à altura de enchimento para SCR-C2 e SCR-C5.



Fonte: a autora.

Outra análise a se fazer seria a comparação entre o volume obtido para o tubo geotêxtil multiplicando-se a área da seção transversal encontrada através das metodologias teóricas pelo comprimento do tubo em relação ao volume obtido pela análise 3D. A Figura 86 apresenta a diferença volumétrica esperada entre elas.

Figura 86 – Diferença volumétrica entre cálculo pelo método da seção estendida e pela modelagem 3D.



Fonte: a autora.

Essa diferença volumétrica foi calculada para os enchimentos analisados e foram obtidos valores entre 1,70 m³ e 2 m³, representando 4,5 % do volume.

Para tubos de maior comprimento, esta porcentagem tende a se reduzir, até se tornar desprezível. Entretanto, para tubos com até 10 m de comprimento, como o estudado, a diferença obtida pode ser considerado um valor relevante em Estações de Tratamento de Água de pequeno porte, aumentando em até semanas a autonomia esperada para o tubo, o que implicaria em um erro de projeto que impacta diretamente na operação e em seus custos.

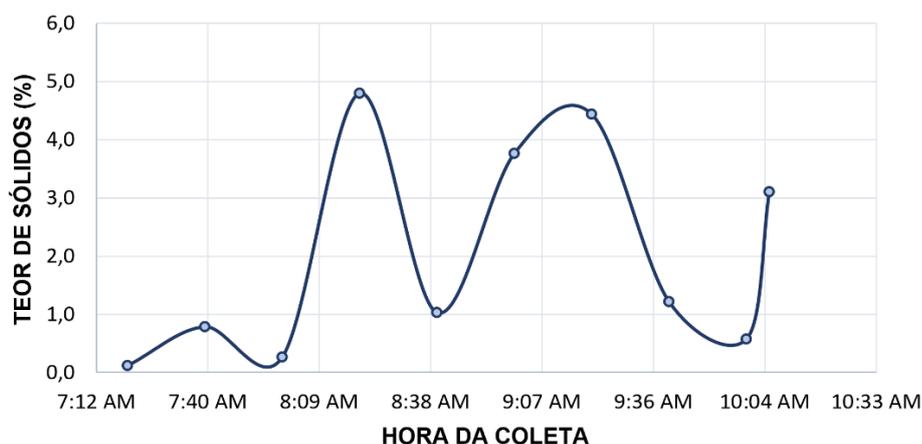
### 4.3 MONITORAMENTO HIDRÁULICO

#### 4.3.1 Lodo de entrada

Para os enchimentos do SCR-S, em que não foi inserido na tubulação de bombeamento um ponto para tomada de amostras, o lodo de entrada foi considerado com teor de sólido constante. Este valor foi adotado a partir do monitoramento da descarga de lavagem de dois decantadores, as unidades 1 e 2.

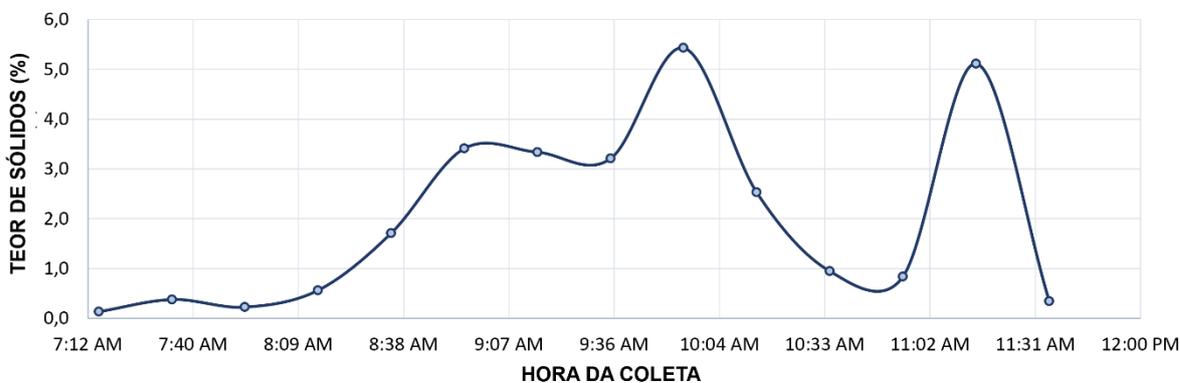
Foram coletadas amostras do poço de visita, mesmo local a partir do qual o bombeamento foi realizado para dentro dos tubos geotêxteis, com intervalos de 10min durante toda a descarga. Este monitoramento foi feito nos dias seguintes ao enchimento SCR-S4, a fim de encontrar valores representativos, já que as características do lodo variam ao longo do ano. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 87 e 88.

Figura 87 – Lavagem do decantador 1, das 4:00 às 10:06, sendo 4:00 às 07:20 a liberação do clarificado sobrenadante e das 07:20 às 10:06 a descarga do lodo do decantador.



Fonte: a autora.

Figura 88 – Lavagem do decantador 2, das 6:00 às 11:35, sendo 06:00 às 06:30 a liberação do clarificado sobrenadante e das 06:30 às 11:35 a descarga do lodo do decantador.



Fonte: a autora.

O teor de sólidos médio encontrado nas duas descargas foi de  $2,01 \pm 1,79$  % (20,1 g/L). Portanto, este valor foi adotado para o lodo de entrada dos enchimentos SCR-S1 a SCR-S4.

O peso específico do lodo para essa concentração de sólidos pode ser calculado pela Equação 4 do item 2.3, sendo  $\gamma_{lodo} = 9,93 \text{ kN/m}^3$ .

Para os enchimentos do SCR-C foi instalado um ponto de coleta de amostras do lodo de entrada a fim de verificar o teor de sólidos e a floculação do lodo.

É possível perceber das Figuras 87 e 88 que as descargas apresentam uma grande variação de teor de sólidos, pois os decantadores não possuem lodo homogêneo, mas sim, com maior concentração de sólidos nas maiores profundidades.

A estrutura indicada para realizar enchimentos com o uso de polímero floculante envolve, como apresentado no “2.1 Estações de Tratamento de Água (ETAS)”, um tanque de equalização, que homogeneiza o lodo, mantendo constante o teor de sólidos e consequentemente, a dosagem de polímero. Como a ETA Bela Vista não possuía esta unidade, a dosagem de polímero foi realizada diretamente no poço de visita, conforme apresentado no “3.4 Configuração dos ensaios”.

Assim, encontrar a dosagem correta de polímero para flocular o lodo foi um grande desafio que foi direcionado pelo ponto de tomada de amostras, que indicava ser necessário aumentar ou diminuir a dosagem conforme as características das amostras coletadas. As Tabelas 25 a 29 apresentam este monitoramento, que foi realizado em amostras coletadas a cada 15min, nas quais foram verificados floculação e teor de sólidos para os enchimentos SCR-C1 a SCR-C5. A Figura 89 apresenta a

esquerda, dois exemplos de amostras floculadas, e a direita, uma amostra não floculada.

Figura 89 – Verificação da floculação do lodo de entrada: a esquerda, duas amostras floculadas e a direita, um exemplo de amostra não floculada.



Fonte: a autora.

Tabela 25 – Verificação do teor de sólidos e floculação do SCR-C1.

Amostra	Tempo decorrido do início do enchimento (min)	Horário	Teor de sólidos	Floculação
1	0	0	0,49	SIM
2	15	15:07	0,62	SIM
3	30	15:22	4,13	NÃO
4	45	15:37	2,15	NÃO
5	60	15:52	3,63	NÃO
<b>Teor de sólidos médio geral (%)</b>			<b>2,20 ± 1,67</b>	

Fonte: a autora.

Tabela 26 – Verificação do teor de sólidos e floculação do SCR-C2.

Amostra	Tempo decorrido do início do enchimento (min)	Horário	Teor de sólidos	Floculação
1	0	08:33	1,83	SIM
2	15	08:48	1,05	SIM
3	30	09:03	0,96	SIM
4	45	09:18	0,37	SIM
5	60	09:33	1,12	SIM
6	75	09:48	3,64	NÃO
7	90	10:03	1,37	SIM
8	105	10:18	2,09	NÃO
9	120	10:33	2,21	SIM
10	135	10:48	2,79	POUCO
11	150	11:03	3,97	NÃO
12	165	11:18	5,65	NÃO
13	180	11:33	3,32	SIM
14	195	11:48	2,12	SIM
15	210	12:03	2,57	SIM
<b>Teor de sólidos médio geral (%)</b>			2,34 ± 1,38	

Fonte: a autora.

Tabela 27 – Verificação do teor de sólidos e floculação do SCR-C3.

Amostra	Tempo decorrido do início do enchimento (min)	Horário	Valor médio	Floculação
1	0	09:04	1,25	SIM
2	15	09:19	5,44	POUCO
3	30	09:34	5,91	POUCO
4	36	09:40	2,51	SIM
5	45	09:49	5,55	SIM
Parada da bomba				
6	66	10:10	11,24	NÃO
<b>Teor de sólidos médio geral (%)</b>			5,32 ± 3,46	

Fonte: a autora.

Tabela 28 – Verificação do teor de sólidos e floculação do SCR-C4.

Amostra	Tempo decorrido do início do enchimento (min)	Horário	Valor médio	Floculação
1	0	09:20	1,43	POUCO
2	15	09:35	4,16	NÃO
Parada da bomba				
3	45	10:05	3,61	NÃO
4	60	10:20	2,64	NÃO
<b>Teor de sólidos médio geral (%)</b>			2,96 ± 1,20	

Fonte: a autora.

Tabela 29 – Verificação do teor de sólidos e floculação do SCR-C5.

Amostra	Tempo decorrido do início do enchimento (min)	Horário	Valor médio	Floculação
1	0	08:26	7,94	NÃO
2	15	08:41	3,52	NÃO
3	19	08:46	1,67	SIM
4	30	08:56	4,19	NÃO
5	33	08:59	4,04	NÃO
<b>Teor de sólidos médio geral (%)</b>			4,27 ± 2,28	

Fonte: a autora.

É possível observar que a floculação apenas foi efetiva quando o teor de sólidos da amostra coletada estava abaixo ou próximo a 2%, teor de sólidos este encontrado como média para descarga do decantador e para o qual a dosagem de polímero foi calculada. Isso significa que a solução de polímero desenvolvida era adequada a essa concentração de sólidos e que quando havia um aumento súbito dos valores, perdia-se o ponto ótimo para floculação.

O valor médio do teor de sólidos de todos os enchimentos foi de 3,42% ± 1,34 (32,4 g/L) e o peso específico do lodo para essa concentração de sólidos pode ser calculado pela Equação 4, sendo  $\gamma_{lodo} = 10,01 \text{ kN/m}^3$ .

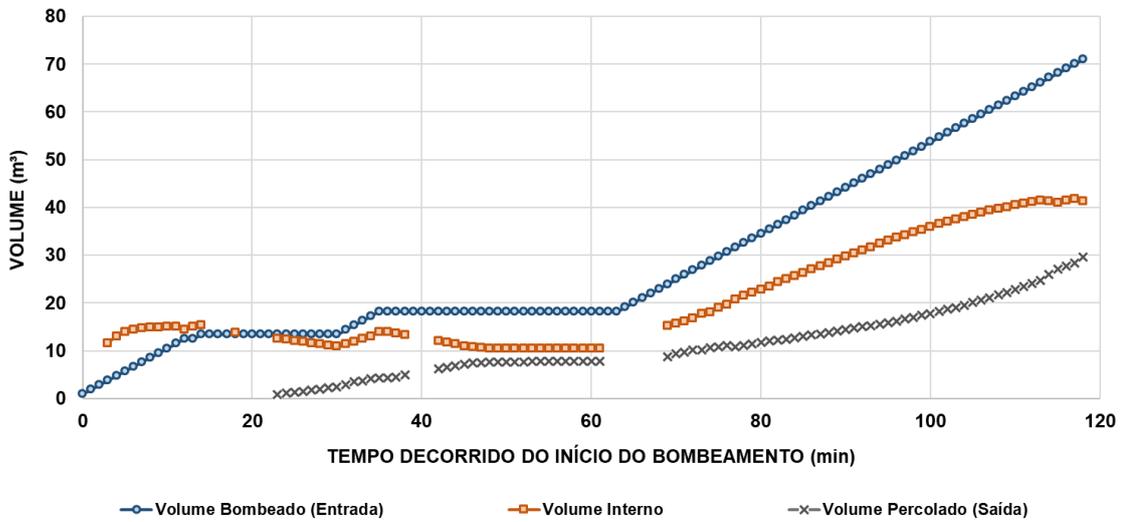
#### 4.3.2 Ciclos de enchimento e deságue

A seguir, são apresentados os enchimentos do SCR-S, indicando o volume bombeado, o volume interno do tubo geotêxtil e o volume percolado ao longo do tempo. Logo, as inclinações encontradas para as linhas de tendência de cada curva traçada representam as vazões em  $\text{m}^3/\text{min}$ .

No total, foram bombeados 158,2  $\text{m}^3$  ao longo dos quatro ciclos de enchimento.

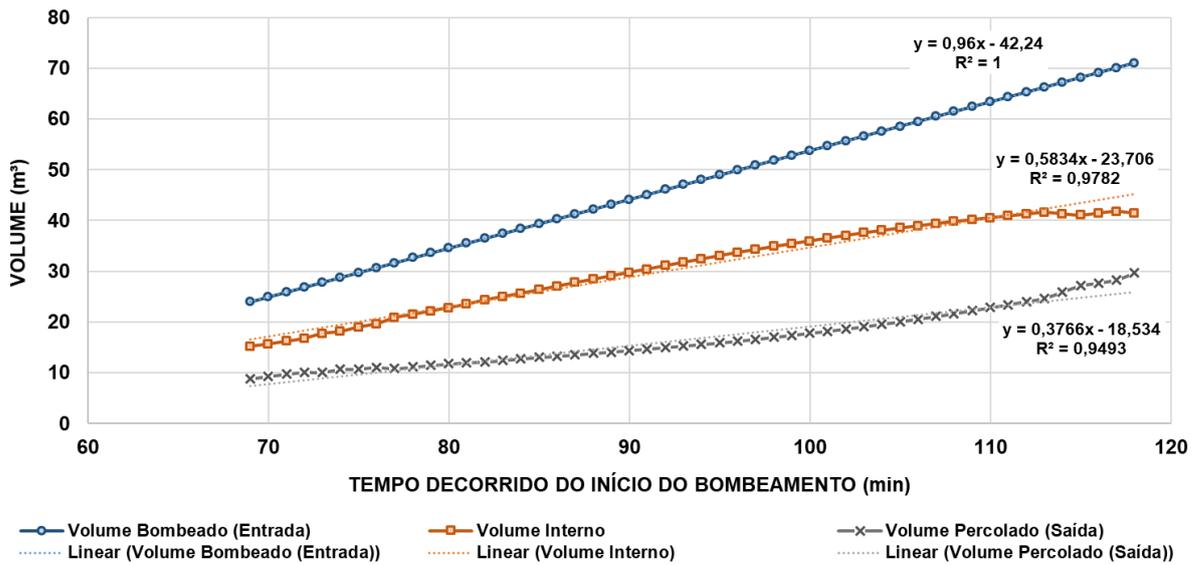
As Figuras 90 e 91 mostram o SCR-S1, sendo que a Figura 90 apresenta os dados iniciais, em que a bomba foi desligada várias vezes e não foi possível estabelecer uma linha de tendência, o que foi feito na Figura 91, eliminando estes dados. As Figuras 92 a 94 mostram respectivamente SCR-S2, SCR-S3 e SCR-S4.

Figura 90 – Emchimento SCR-S1 com dados iniciais – 15/05/2019.



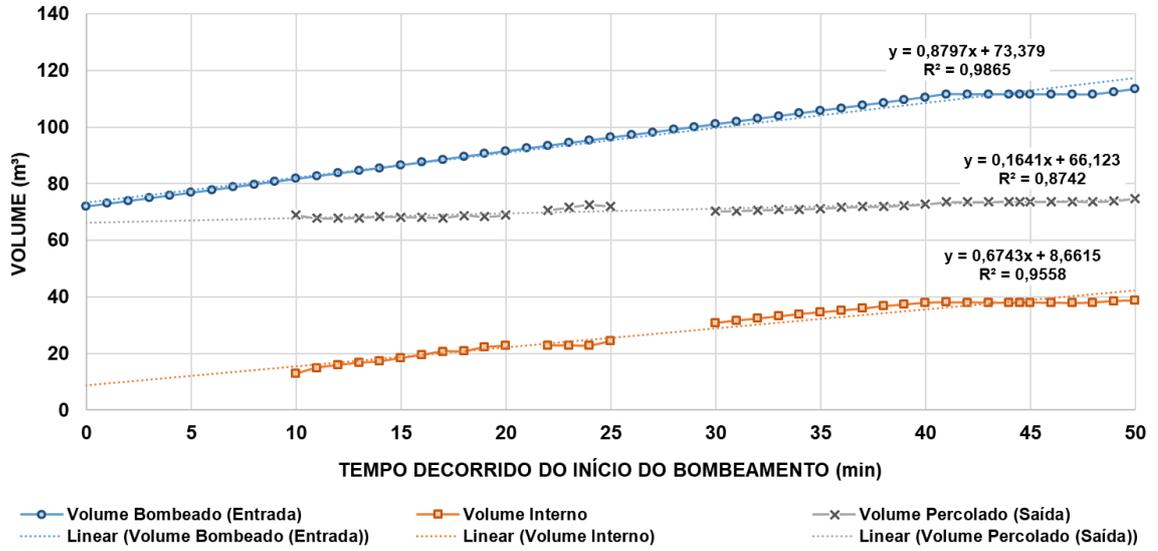
Fonte: a autora.

Figura 91 – Enchimento SCR-S1 sem dados iniciais – 15/05/2019.



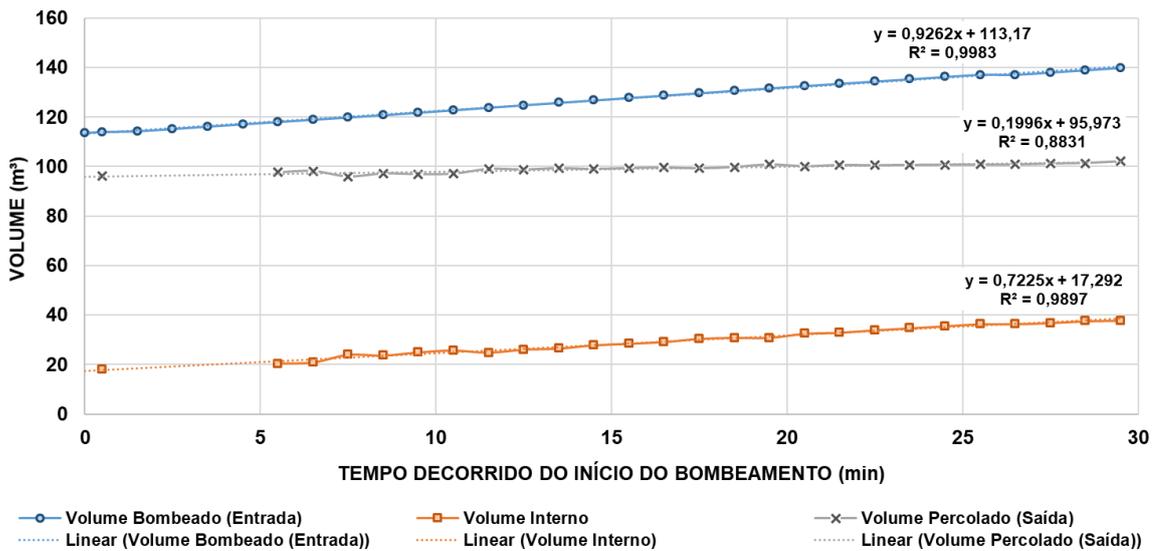
Fonte: a autora.

Figura 92 – Enchimento SCR-S2 - 22/05/2019.



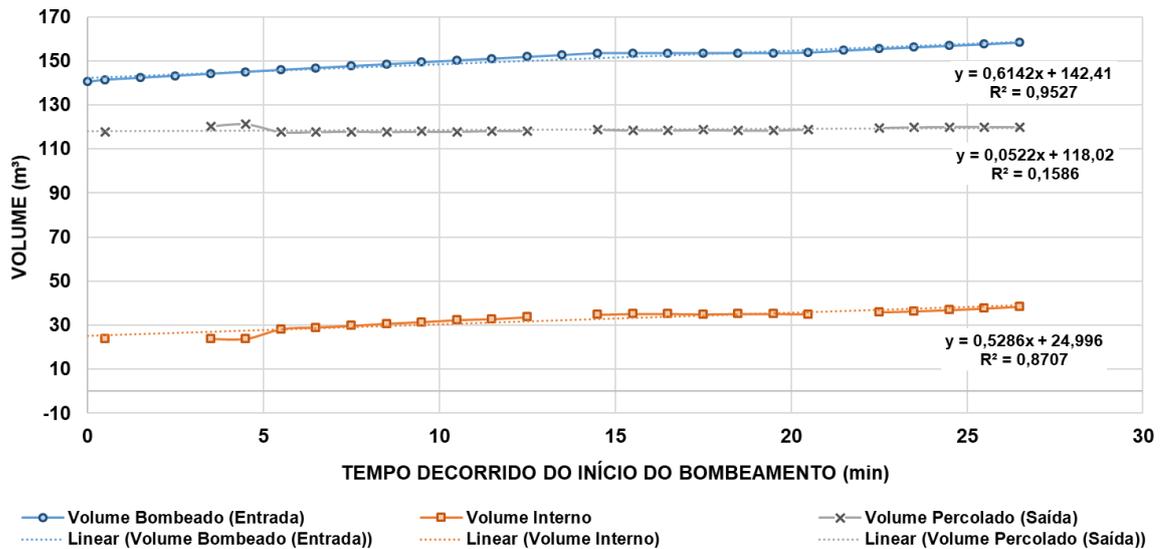
Fonte: a autora.

Figura 93 – Enchimento SCR-S3 - 29/05/2019



Fonte: a autora.

Figura 94 – Enchimento SCR-S4 - 05/06/2019.



Fonte: a autora.

A inclinação da linha de tendência apresentada nos gráficos representa a média da relação de cada volume no tempo, ou seja, a vazão. Assim, é possível analisar que não há grandes variações para a vazão de entrada, como esperado, por ser uma variável controlável através da bomba. Nota-se um decréscimo no último enchimento, que pode ser justificado pelo fato deste ter sido muito curto e pelo fato do tubo geotêxtil já estar com altura consideravelmente alta, o que dificulta a obtenção de estabilidade no bombeamento em alta intensidade.

A fim de analisar os ciclos como um todo e o comportamento da vazão de saída, as Figuras 95 a 97 mostram uma visão geral do ensaio:

- a Figura 95, apresenta os dados em função da altura, onde podemos notar o momento dos enchimentos e alcance da altura máxima e posterior deságue;
- a Figura 96 mostra um balanço hidráulico, como o apresentado por cada ciclo, mostrando em termos volumétricos todo o volume bombeado, armazenado e percolado;
- por fim, a Figura 97 apresenta a vazão de saída durante todo o processo. É possível perceber que os picos do gráfico ocorrem durante e nas horas seguintes aos enchimentos e entre estes, a vazão se mantém baixa, próxima a zero, sendo cada vez menor com o passar dos ciclos.

Como balanço hidráulico, entende-se a contabilização dos ciclos de enchimento, totalizando valores bombeado, retido e percolado, que serão mostrados a seguir e que podem ser verificados na Figura 96:

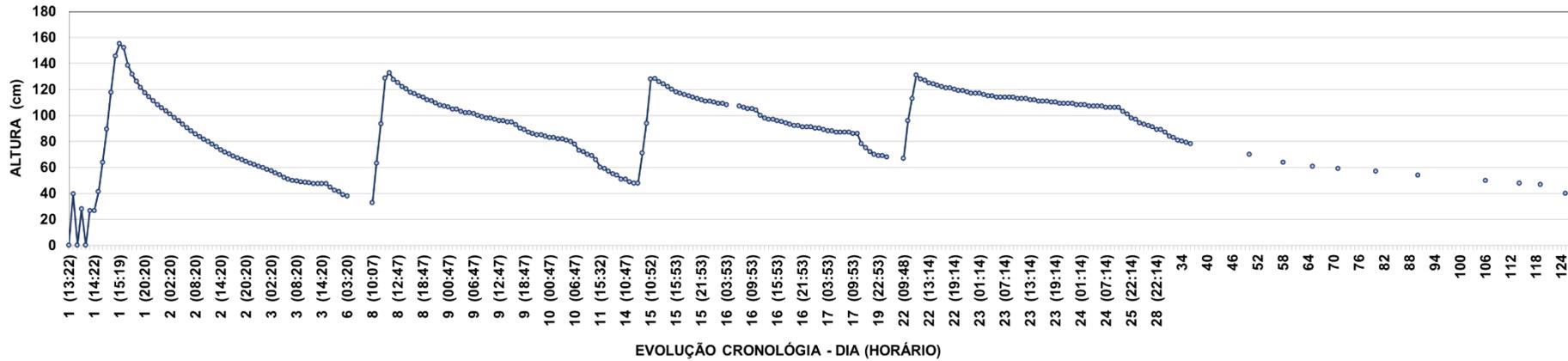
- através do medidor de vazão foram contabilizados 158 m<sup>3</sup> de lodo bombeados;
- através das análises volumétricas apresentadas no item 4.2, ficaram retidos no interior do tubo geotêxtil 15 m<sup>3</sup>;
- através da Equação 18 (item 3.7), que determina que do volume total bombeado, o que não ficou retido no interior do tubo, percolou, originando a terminologia “balanço”, foi determinado o volume total percolado de 143 m<sup>3</sup>.

Segundo o fabricante, o tubo geotêxtil pode ser preenchido até altura de 1,30 m e possui capacidade volumétrica de 45 m<sup>3</sup>, portanto, o tubo foi capaz de receber em 4 ciclos de enchimento o equivalente a 3,5 vezes sua capacidade volumétrica e após o período de consolidação, quando restaram 15 m<sup>3</sup> em seu interior, este ficou preenchido com um terço de sua capacidade.

No SCR-S1, foram bombeados 71 m<sup>3</sup> de lodo, ou seja, o tubo foi capaz de receber aproximadamente 1,6 vez sua capacidade volumétrica em um único enchimento, mostrando que a drenagem instantânea inicial foi eficiente. Este volume bombeado foi sendo reduzido ao longo dos ciclos devido a quantidade de sólidos retidos no interior do tubo ir se acumulando, diminuindo assim o volume de armazenamento livre restante e, também, devido a formação do *filter cake*, que fez com que a drenagem fosse cada vez mais lenta e, portanto, o enchimento mais rápido com o uso da mesma bomba.

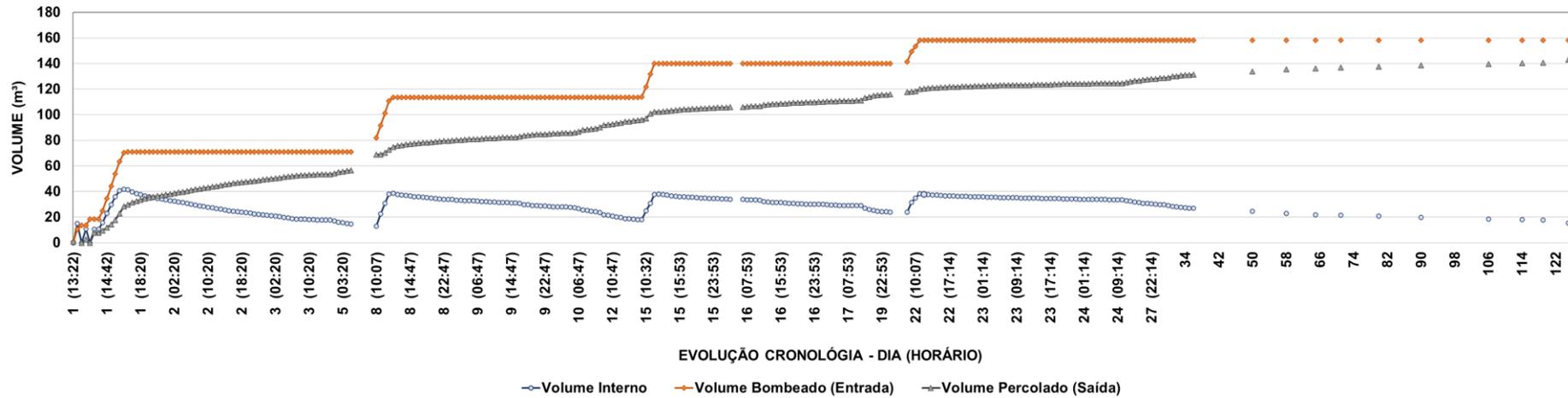
Como exemplo, o SCR-S4 foi iniciado com altura de sólidos retidos de 67,12 cm, ou seja, com pouco mais da metade de sua capacidade volumétrica alcançada e nesse enchimento, foram bombeados 18,2 m<sup>3</sup>, o que significa que praticamente não houve drenagem instantânea, e o volume bombeado ficou retido no interior do tubo, fato que também pode ser observado na Figura 97, em que a vazão de saída do no momento do SCR-S4 é muito baixa.

Figura 95 – Ciclos de enchimento e drenagem do SCR-S em função da altura.



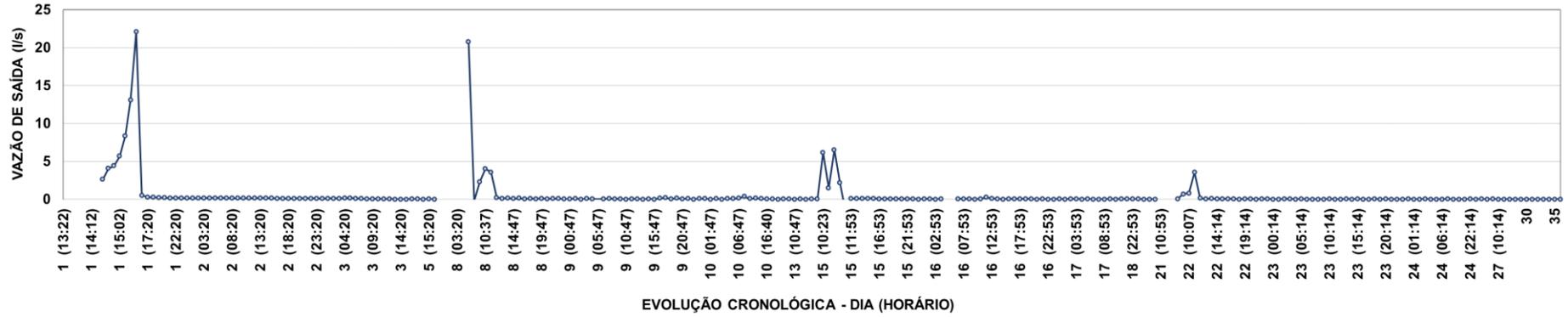
Fonte: a autora.

Figura 96 – Balanço hidráulico SCR-S: volume bombeado total de 158 m<sup>3</sup>, volume interno 15 m<sup>3</sup> e volume percolado total 143 m<sup>3</sup>.



Fonte: a autora.

Figura 97 – Vazão do percolado durante os ciclos de enchimento e drenagem para SCR-S.



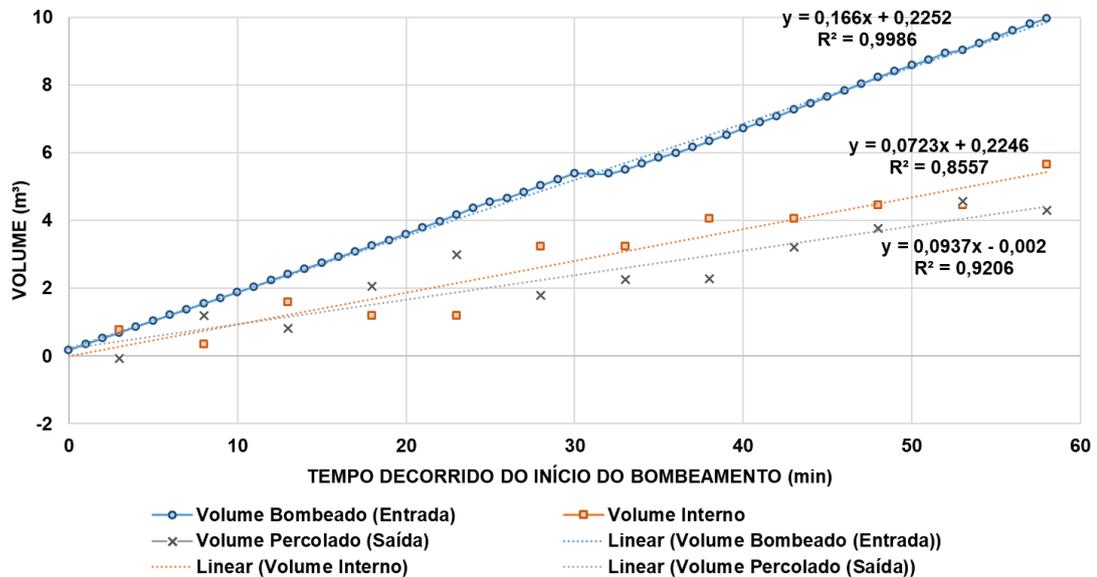
Fonte: a autora.

A seguir, são apresentados os enchimentos do SCR-C, indicando o volume bombeado, o volume interno do tubo geotêxtil e o volume percolado ao longo do tempo. Logo, as inclinações encontradas para as linhas de tendência de cada curva traçada representam as vazões em m<sup>3</sup>/min.

No total, foram bombeados 138,46 m<sup>3</sup> ao longo dos cinco ciclos de enchimento.

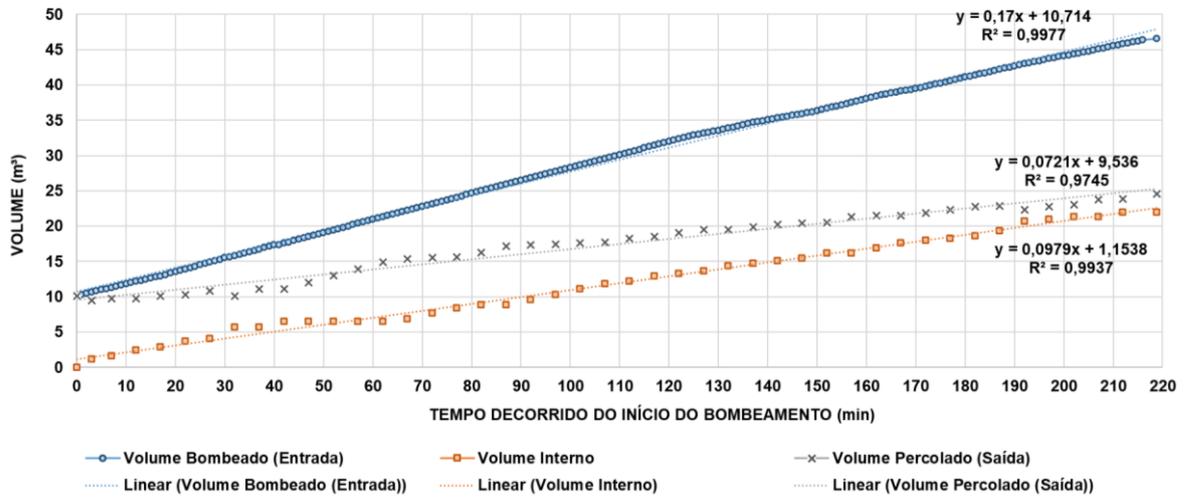
As Figuras 98 e 99 mostram o SCR-C1 e SCR-C2, nos quais a bomba utilizada possuía baixa vazão, não levando o tubo à altura máxima de enchimento. As Figuras 100 a 102 mostram respectivamente SCR-C3, SCR-C4 e SCR-C5.

Figura 98 – Enchimento SCR-C1 – 09/10/2019.



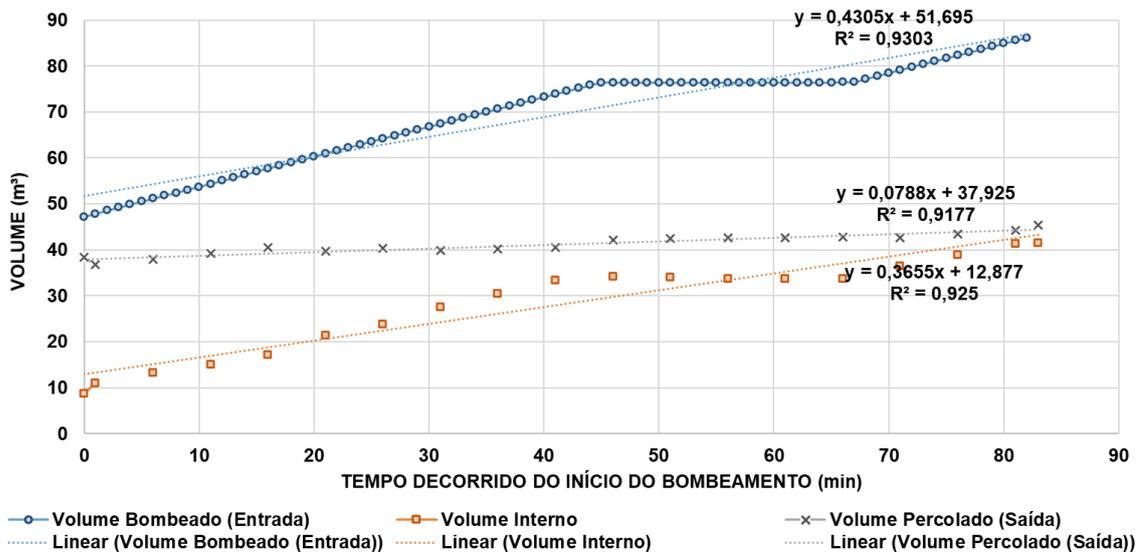
Fonte: a autora.

Figura 99 – Enchimento SCR-C2 – 16/10/2019.



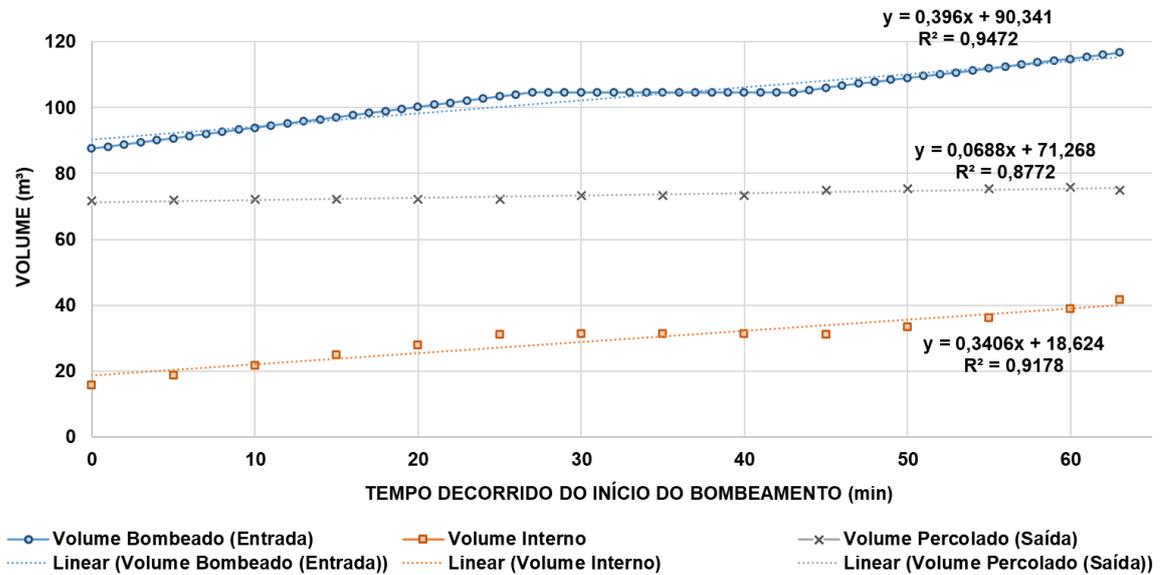
Fonte: a autora.

Figura 100 - Enchimento SCR-C3 – 23/10/2019.



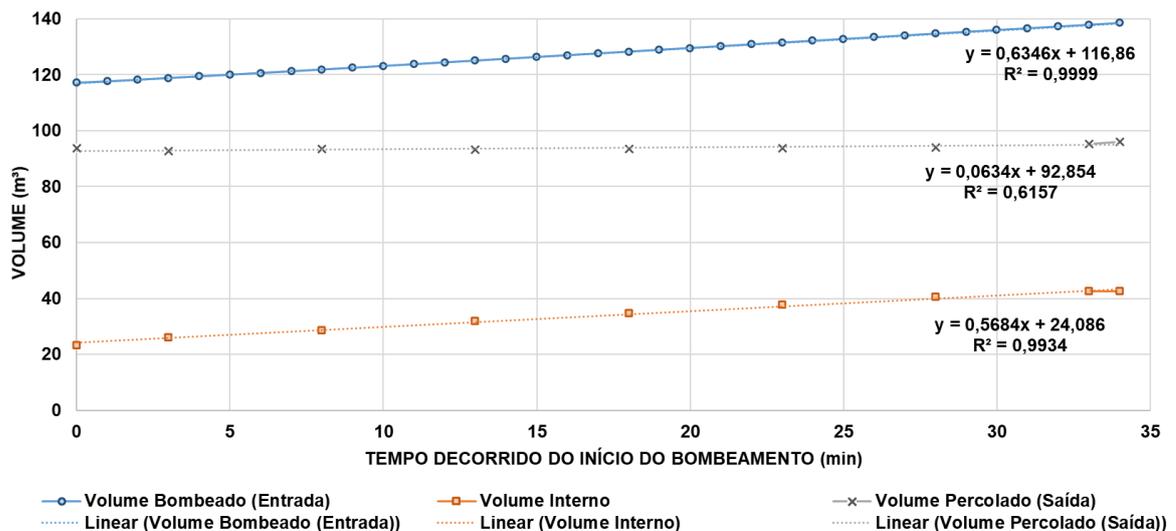
Fonte: a autora.

Figura 101 - Enchimento SCR-C4 – 30/10/2019.



Fonte: a autora.

Figura 102 – Enchimento SCR-C5 – 06/11/2019.



Fonte: a autora.

É possível analisar dos gráficos que mesmo com a vazão de entrada tendo sido alterada entre os enchimentos SCR-C2 e SCR-C3, a vazão de saída durante todos os enchimentos se manteve entre 3 e 6 l/s, valores estes que podem ser analisados de forma independente na Figura 103.

Duas análises podem ser feitas a partir destes valores:

- estes números demonstram que, apesar da floculação não ter ocorrido de forma precisa, o uso do polímero floculante contribuiu para manutenção das vazões de saída; ou

- as vazões foram mais baixas nos 2 primeiros ciclos devido a bomba possuir menor vazão, e então, quando a bomba com maior vazão foi utilizada no SCR-C3, o *filter cake* já havia se formado.

A fim de analisar os ciclos como um todo e o comportamento da vazão de saída, as Figuras 104 e 105 mostram uma visão geral do ensaio:

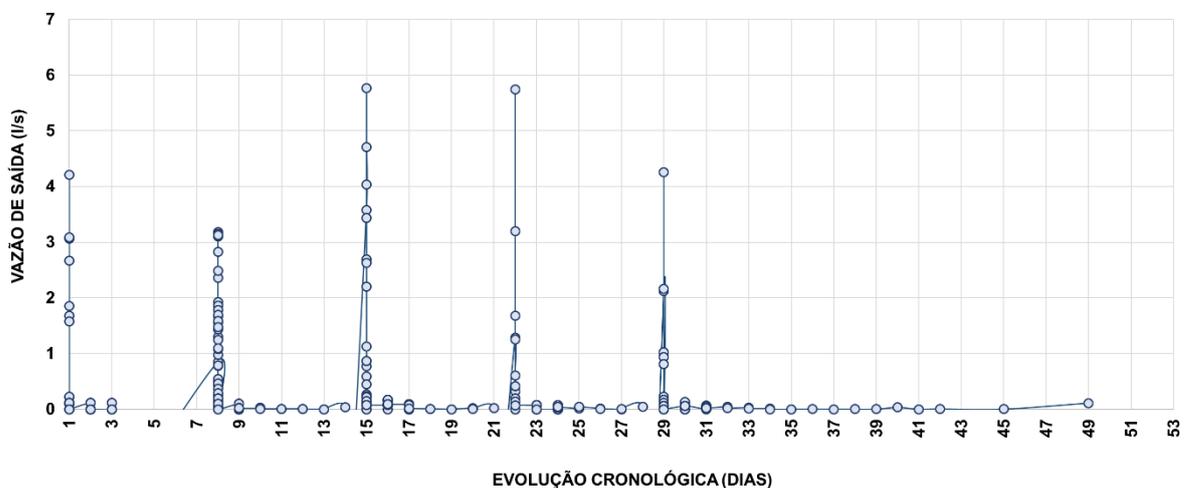
- a Figura 104 apresenta os dados em função da altura, onde podemos notar o momento dos enchimentos e alcance da altura máxima e posterior deságue;
- a Figura 105 mostra um balanço hidráulico, como o apresentado por cada ciclo, mostrando em termos volumétricos todo o volume bombeado, armazenado e percolado.

Foram bombeados no total 138,46 m<sup>3</sup> de lodo e retidos no interior do tubo geotêxtil apenas 19,98 m<sup>3</sup>, percolando um total de 118,48 m<sup>3</sup>.

Segundo o fabricante, o tubo geotêxtil pode ser preenchido até altura de 1,30m e possui capacidade volumétrica de 45m<sup>3</sup>, portanto, o tubo foi capaz de receber em 5 ciclos de enchimento o equivalente a 3,1 vezes sua capacidade volumétrica e após o período de consolidação, quando restaram 19,98 m<sup>3</sup> em seu interior, este ficou preenchido com 44,4 % de sua capacidade.

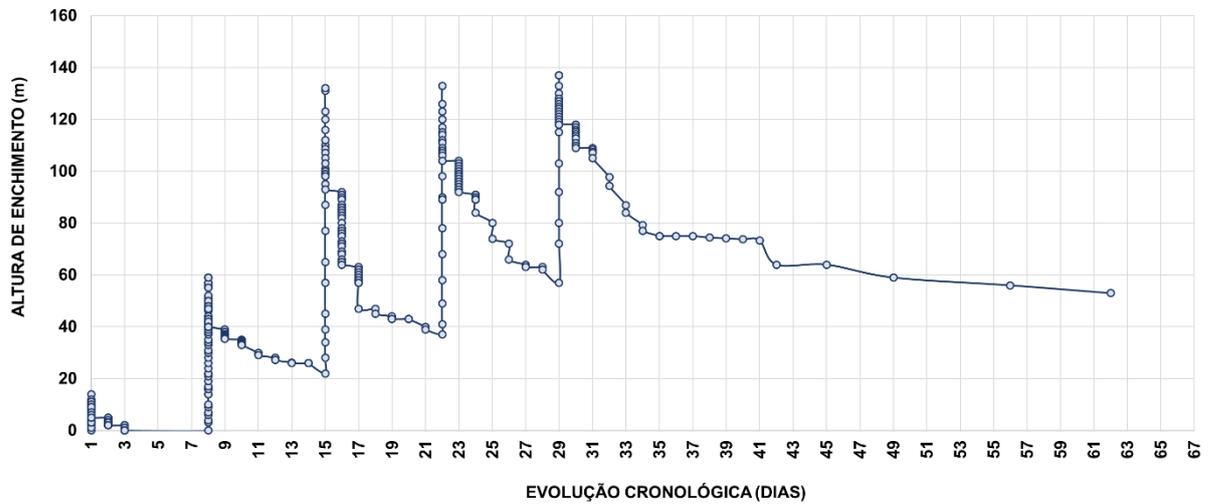
O volume bombeado total foi menor que o volume do SCR-S, entretanto, o volume de sólidos retidos no interior do tubo foi 33 % maior, fato este justificado pelo teor de sólidos do lodo bombeado, que era 70% maior do que do SCR-S.

Figura 103 – Vazão do percolado durante os ciclos de enchimento e drenagem para SCR-C.



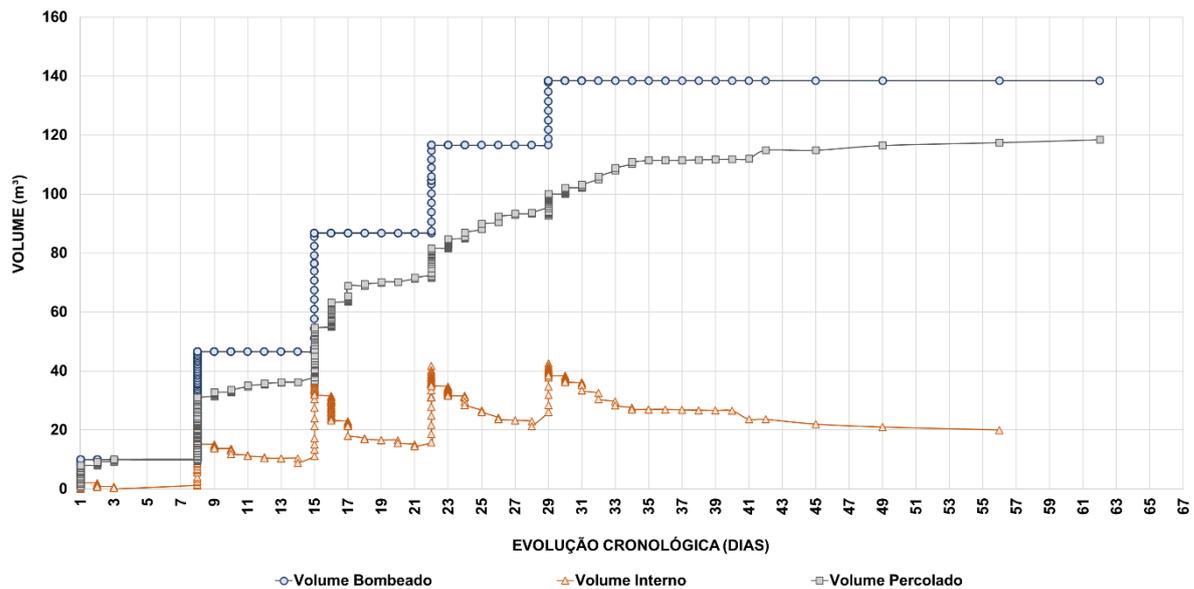
Fonte: a autora.

Figura 104 – Ciclos de enchimento e drenagem do SCR-C em função da altura.



Fonte: a autora.

Figura 105 – Balanço hidráulico SCR-C: volume bombeado total de 138,46 m<sup>3</sup>, volume interno 19,98 m<sup>3</sup> e volume percolado total 118,48 m<sup>3</sup>.



Fonte: a autora.

### 4.3.3 Etapa de consolidação

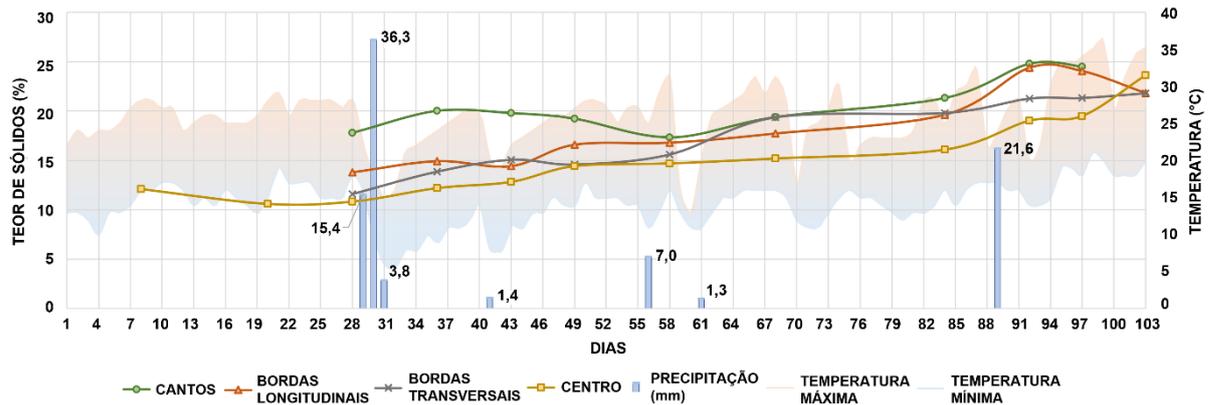
A evolução do teor de sólidos na etapa de consolidação foi obtida pela coleta de amostras.

Foram analisadas as influências climáticas na evolução do teor de sólidos. Os gráficos das Figura 106 e Figura 107 (SCR-S e SCR-C, respectivamente) mostram os

valores de teor de sólidos por região do tubo geotêxtil. Ao fundo, a amplitude térmica da cidade de Nova Odessa no período e as precipitações que ocorreram na ETA.

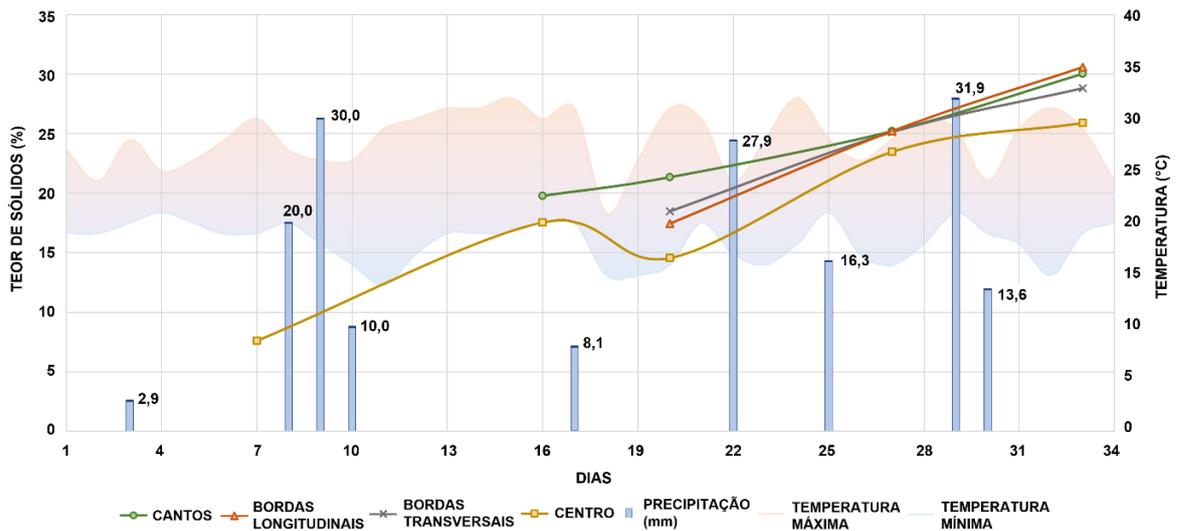
As temperaturas foram obtidas de AccuWeather (2020) e as precipitações foram monitoradas pela estação meteorológica interna da ETA.

Figura 106 – Evolução do teor de sólidos na etapa de consolidação SCR-S



Fonte: a autora.

Figura 107 – Evolução do teor de sólidos na etapa de consolidação SCR-C.



Fonte: a autora.

Para o SCR-S, houve uma tendência de, com o aumento da temperatura nos últimos dias, o teor de sólidos evoluir mais rapidamente. Houve quedas de temperatura associadas a precipitações, mas estas condições não causaram quedas no teor de sólidos, que continuou a evoluir.

O tempo de consolidação do SCR-S foi de 103 dias e do SCR-C, 34 dias. A Figura 108 apresenta o SCR-S após o período de consolidação, aberto e pronto para ser removido.

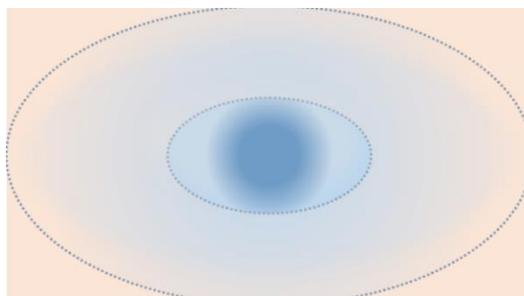
Figura 108 – SCR-S após o período de consolidação, aberto e pronto para ser removido.



Fonte: a autora.

Nas Figuras 106 e 107 também é possível verificar que os cantos atingiram maior teor de sólidos que as bordas, que por sua vez apresentam maior teor de sólidos que o centro. Isso indica que as áreas com maior superfície de exposição em relação ao volume de lodo apresentam secagem mais rápida. A Figura 109 apresenta esquematicamente essa tendência encontrada nos dois tubos.

Figura 109 – As bordas (em rosa) tendem a evoluir mais rapidamente que o centro (em azul) em teor de sólidos.



Fonte: a autora.

Com intuito de analisar a distribuição do teor de sólidos em perfil no SCR-C, removeu-se em torno de 1 m de lodo a partir de uma das bordas transversais, a fim de eliminar a influência do geotêxtil nas bordas.

O perfil encontrado é apresentado na Figura 110, em que se identifica claramente 3 camadas de deposição, sendo a mais inferior de tom cinza escuro, a intermediária em tom cinza claro e a superior, em tom terroso. Foram coletadas amostras destas 3 camadas e analisado o teor de sólidos, que se encontra indicado em amarelo na Figura 110.

A camada mais superficial, por estar mais exposta, atingiu maior teor de sólidos. As duas camadas abaixo apresentam teor de sólidos semelhantes. Acredita-se que a mudança de coloração esteja interligada ao tempo de deposição e reações químico-biológicas que ocorreram neste período.

Figura 110 – Separação do lodo consolidado em camadas ao longo do perfil.

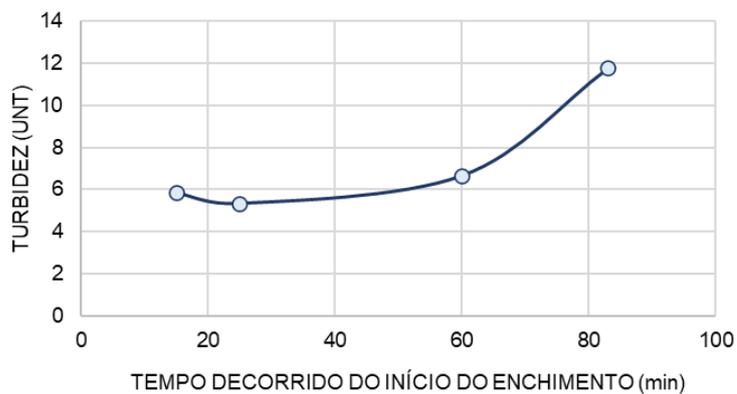


Fonte: a autora.

#### 4.3.4 Ensaio de turbidez do percolado

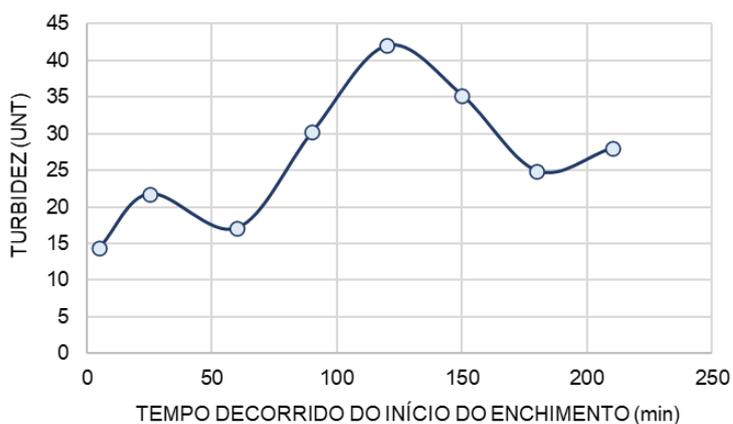
As Figuras 111 a 115 apresentam o valor médio de três ensaios de turbidez realizados para cada amostra com o percolado do SCR-C. Essas informações não foram coletadas para o SCR-S. As amostras foram coletadas na tubulação de saída do sistema, que direcionava o percolado a tubulação de descarte.

Figura 111 – Variação da turbidez para o SCR-C1.



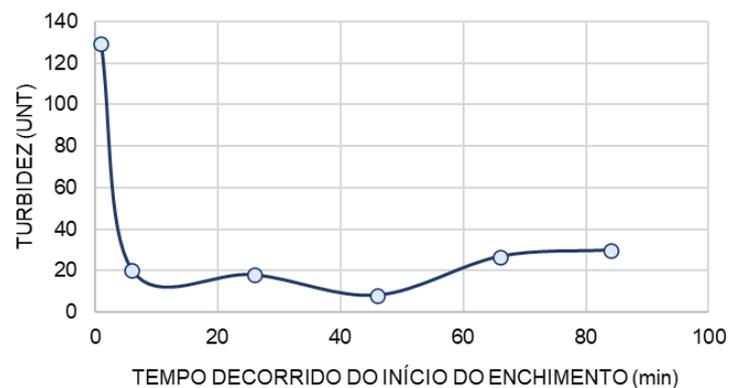
Fonte: a autora.

Figura 112 – Variação da turbidez para o SCR-C2.



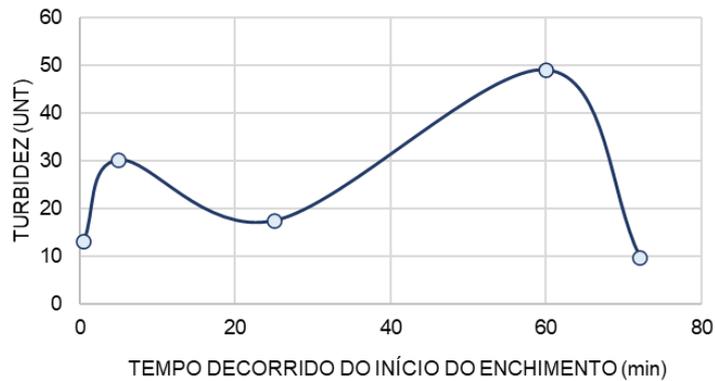
Fonte: a autora.

Figura 113 – Variação da turbidez para o SCR-C3.



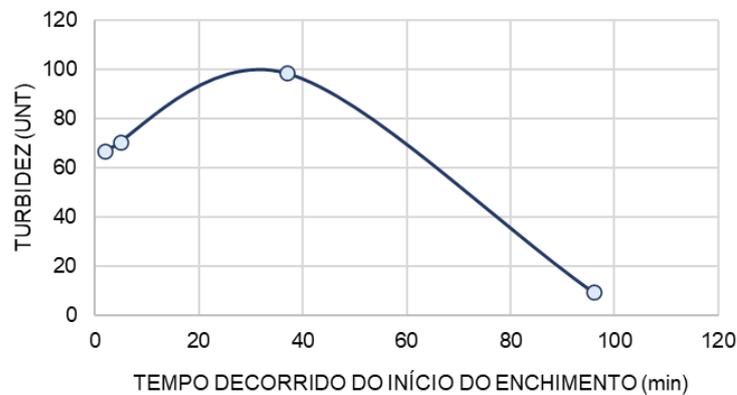
Fonte: a autora.

Figura 114 – Variação da turbidez para o SCR-C4.



Fonte: a autora.

Figura 115 – Variação da turbidez para o SCR-C5.



Fonte: a autora.

Para corpos d'água Classe 2, a resolução CONAMA nº 357 estabelece o lançamento de efluentes com turbidez inferior a 100 UNT. Observa-se que com exceção do resultado coletado após 1 minuto no SCR-C3, todas as demais coletas indicam que, mesmo utilizando dosagens imprecisas de polímero, o percolado obtido possui, em termos de turbidez, qualidade para ser lançado em corpos d'água Classe 2, indicando o bom desempenho do geotêxtil não tecido aplicado como filtro.

#### 4.4 MONITORAMENTO MECÂNICO

##### 4.4.1 Deformação mobilizada – SCR-S

As Figuras 116 a 119 apresentam os gráficos das deformações mobilizadas no sentido circunferencial em relação à altura do tubo geotêxtil para os 4 ciclos de enchimento realizados, do SCR-S1 a SCR-S4, respectivamente. A linha vertical em

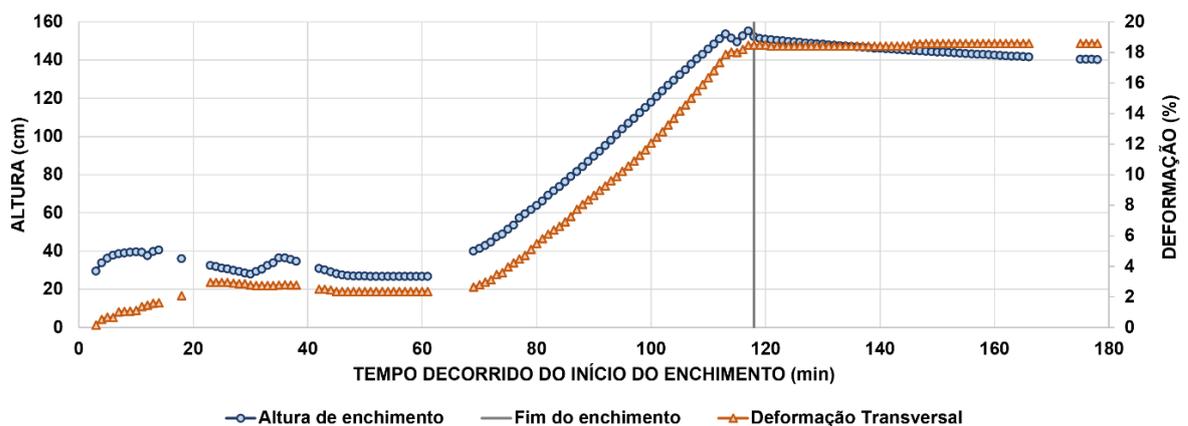
cinza nos gráficos indica o momento em que o enchimento foi encerrado, desligando a bomba e iniciando o deságue.

É possível perceber que em alguns enchimentos, o momento de máxima sollicitação não coincide exatamente com o momento da altura máxima. Acredita-se que essa não concordância temporal seja devido há travamentos do encoder, em que a extensão da linha responsável pela medição da deformação ficou presa no carretel e teve um disparo abrupto, como pode ser visto nas regiões das Figuras 117 e 118 circuladas em vermelho dos enchimentos SCR-S2 e SCR-S3.

Cazzuffi *et al.* (1997) afirma que a fluência de um geotêxtil reflete o comportamento elasto-viscoplástico dos geossintéticos em geral e representa a deformação em função do tempo que estes materiais sofrem sob carregamento constante. Analisando o pequeno acréscimo de deformação que se desenvolve após longo período do término do enchimento, em que o tubo ainda apresenta grandes alturas, e portanto, manutenção da sollicitação hidrostática, pode-se sugerir que um mecanismo similar ao processo de fluência do material esteja ocorrendo.

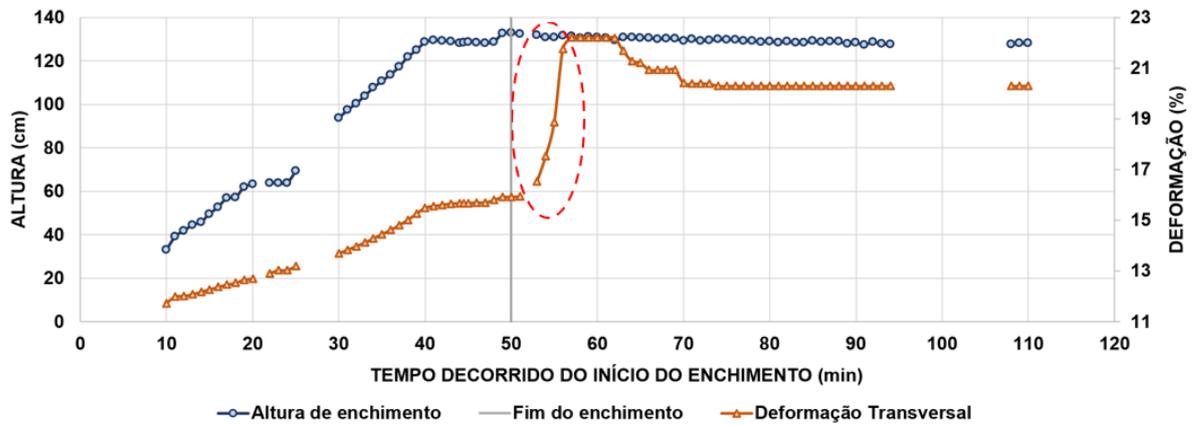
Para as análises seguintes, os valores mínimos e máximos encontrados para cada enchimento são apresentados corrigindo a não concordância temporal entre altura e deformação mobilizada, apresentando para a altura máxima de enchimento, a deformação máxima.

Figura 116 – SCR-S1: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial.



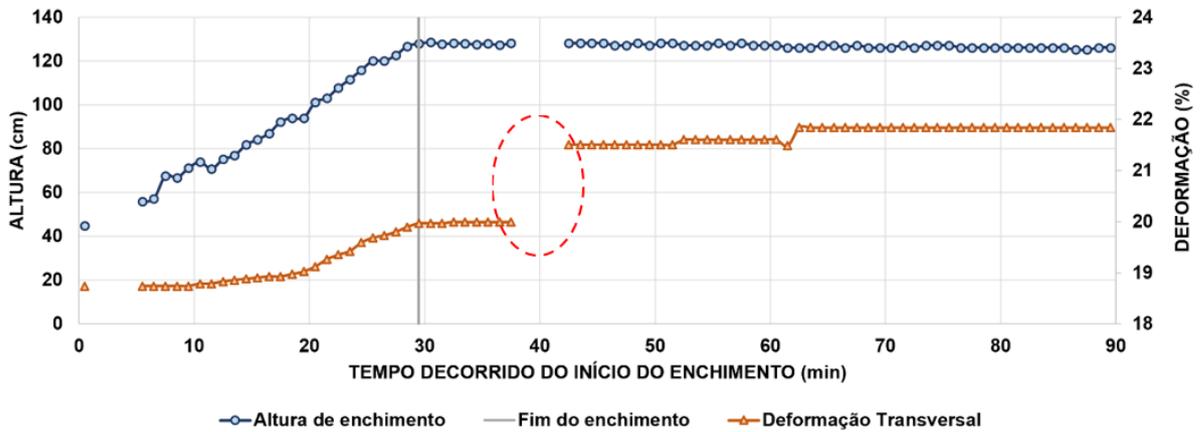
Fonte: a autora.

Figura 117 – SCR-S2: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial.



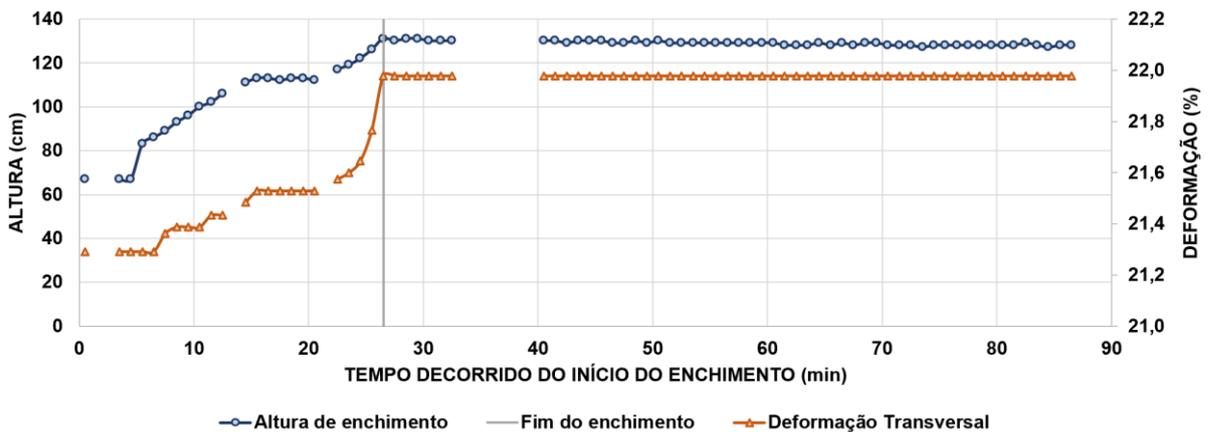
Fonte: a autora.

Figura 118 – SCR-S3: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial.



Fonte: a autora.

Figura 119 – SCR-S4: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial.

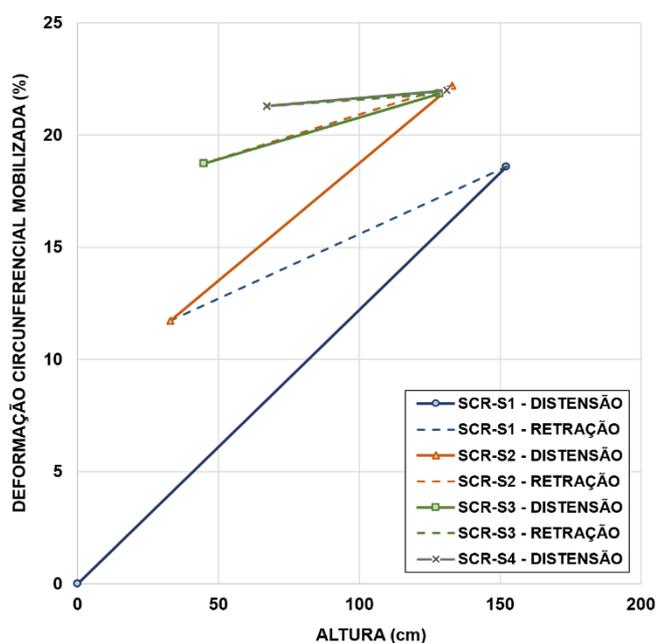


Fonte: a autora.

Resumindo os dados de alturas mínimas e máximas, com as respectivas deformações mobilizadas na Figura 120, é possível analisar que, mesmo que a altura de enchimento não seja superior à do enchimento anterior, a deformação mobilizada é crescente ao longo dos ciclos e nos períodos de deságue, a retração do geotêxtil passa a ser cada vez menor, apontando a perda de resiliência do material. A Figura 120 mostra que a cada novo enchimento, as retas traçadas tornam-se mais horizontais: é possível perceber uma grande distensão e retração no primeiro e segundo enchimento, entretanto, no terceiro e quarto, essa movimentação torna-se mais suave.

Como interpretação destes dados, podemos avaliar que a solicitação no geotêxtil foi muito próxima em todos os enchimentos. Como nos primeiros ciclos o material ainda se encontrava virgem, a solicitação gerou uma grande distensão do material. No período de drenagem, o material reteve parte da distensão, mas obteve uma retração considerável. Essa distensão residual, para um nível similar de carregamento, gerou uma distensão mais elevada no segundo enchimento. A partir de então, o material parece ter perdido a capacidade de distensão e retração em grandes magnitudes, ficando os valores cada vez mais próximos entre si. Isso indica que, se tivessem sido realizados mais ciclos de enchimento, provavelmente em ciclos futuros próximos, obteríamos um valor constante, sem distensões e retrações, estando o geotêxtil adaptado ao nível de solicitação.

Figura 120 – Valores mínimos e máximos para altura e deformação mobilizada no sentido circunferencial para o SCR-S, identificando a distensão e retração do geotêxtil.



Fonte: a autora.

Com a intenção de comparar os valores de deformação obtidos com os modelos analíticos, para o SCR-S1 foram calculados para a altura máxima de enchimento, a tração circunferencial, o perímetro final e a deformação através da metodologia de Cantré e Saathoff (2011) apresentados na Tabela 30. Para as metodologias de Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014), utilizando a análise feita no item 4.1.1, os resultados para tração circunferencial encontrados foram respectivamente 6,32 e 6,93 kN/m.

Tabela 30 – Resultados obtidos do código de programação para o método de Cantré e Saathoff. Parâmetros de entrada:  $L_0 = 9,20$  m,  $Y = 9,93$  kN/m<sup>3</sup>,  $H = 1,52$  m,  $\nu_1 = 0,5$  para SCR-S1.

Parâmetros de saída	$J_{in} = 33$ kN/m	$J = 55$ kN/m
Tração circunferencial (kN/m)	6,33	6,51
Perímetro final (m)	10,83	10,20
Deformação (%)	30,3	17,5

Fonte: a autora.

A deformação encontrada em campo pelo encoder foi de 18,6% no sentido circunferencial, muito próxima da prevista pelo método de Cantré e Saathoff (2011) com  $J = 55$  kN/m, de 17,5%. Este dado precisa ser analisado com cautela, pois os métodos consideram que a deformação, e portanto, mobilização da tração, apresenta-

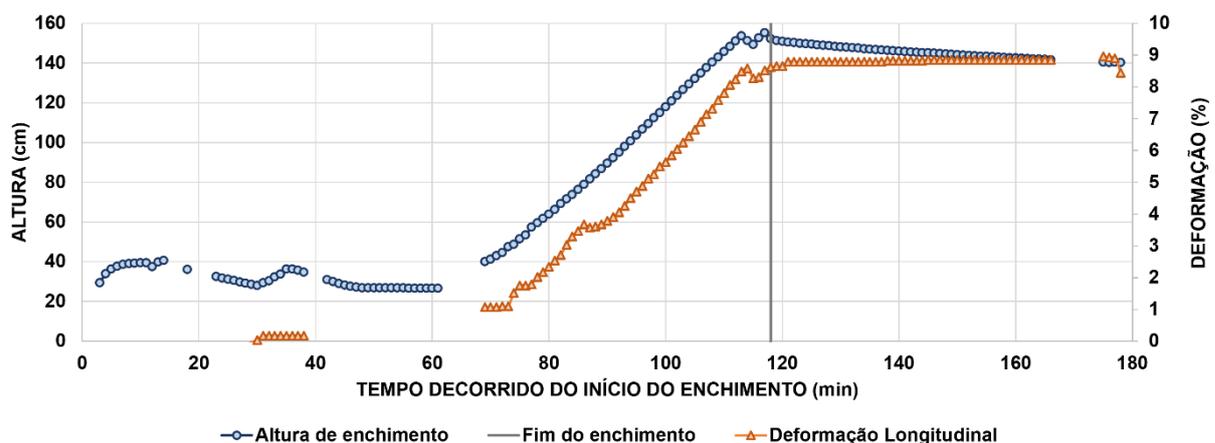
se uniforme por todo perímetro da seção transversal, enquanto muitos estudos, como o monitoramento de Guo (2012) e a modelagem de Silva (2019), já comprovaram que este parâmetro não se comporta de maneira uniforme. Portanto, a posição do encoder interfere diretamente na aproximação entre os dados.

Como os métodos de Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014) consideram que o geotêxtil não se deforma, apenas para comparação da tração circunferencial encontrada, temos que o resultado por Cantré e Saathoff (2011) é intermediário entre os de Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014).

Um estudo adicional foi realizado para a metodologia de Guo *et al.* (2014). Considerando como dado de entrada pressão de enchimento igual a zero no algoritmo de Silva (2019), o equilíbrio é encontrado para altura de enchimento 1,46m, sendo a solicitação à tração do material igual a 5,32 kN/m. Isto significa que até a altura de 1,46m, o tubo geotêxtil apenas será solicitado pela pressão hidrostática do material de enchimento, sendo a solicitação a tração calculada pela Equação 9, item 2.7.2, com  $P$  igual a zero.

As Figuras 121 a 124 apresentam os gráficos das deformações mobilizadas no sentido longitudinal em relação à altura do tubo geotêxtil para os 4 ciclos de enchimento realizados, do primeiro ao quarto, respectivamente.

Figura 121 – SCR-S1: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido longitudinal.



Fonte: a autora.

Figura 122 – SCR-S2: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido longitudinal.

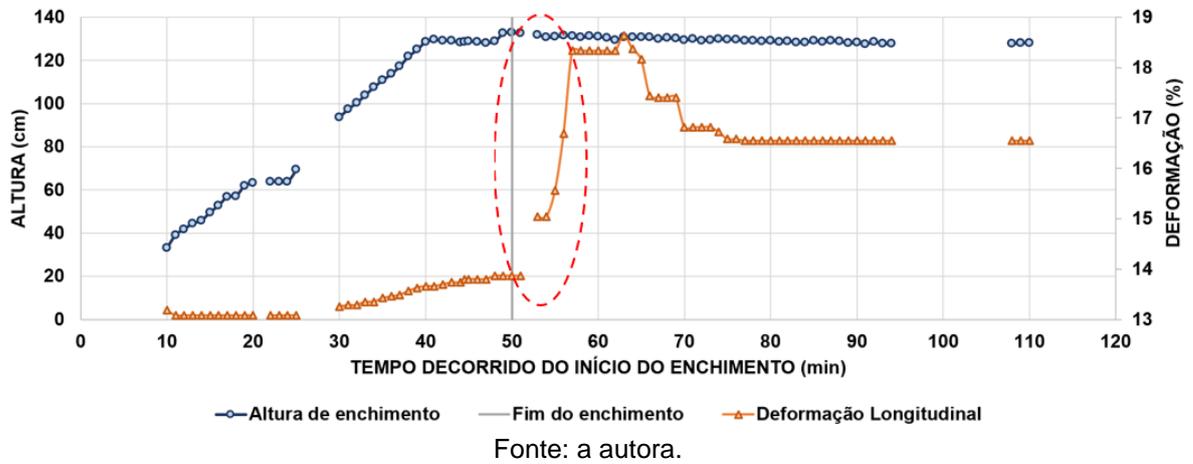


Figura 123 – SCR-S3: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido longitudinal.

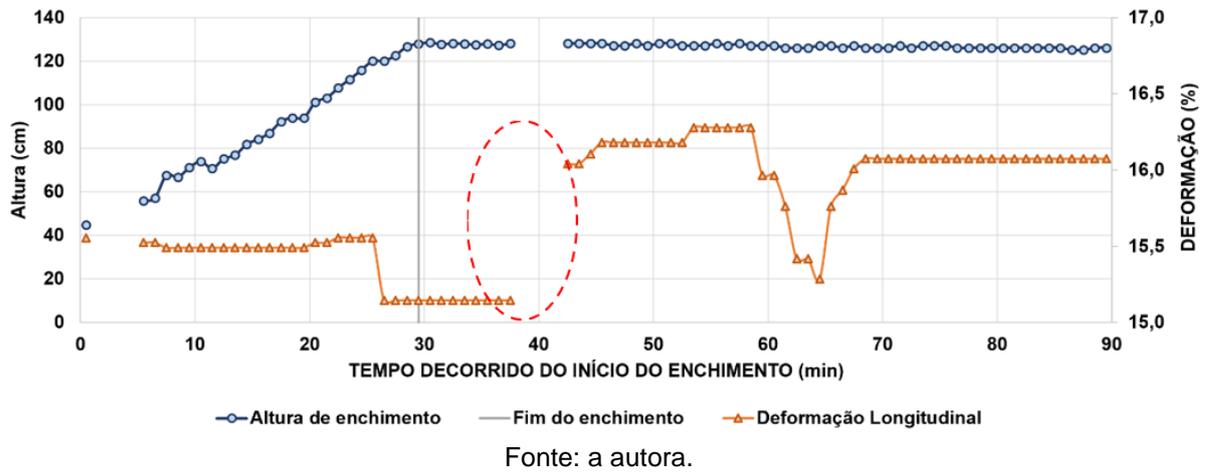
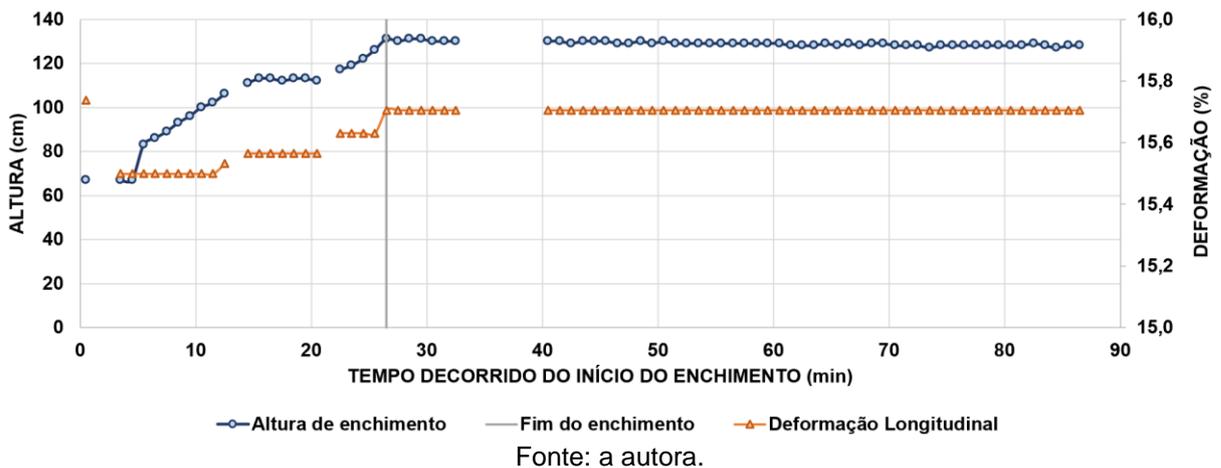


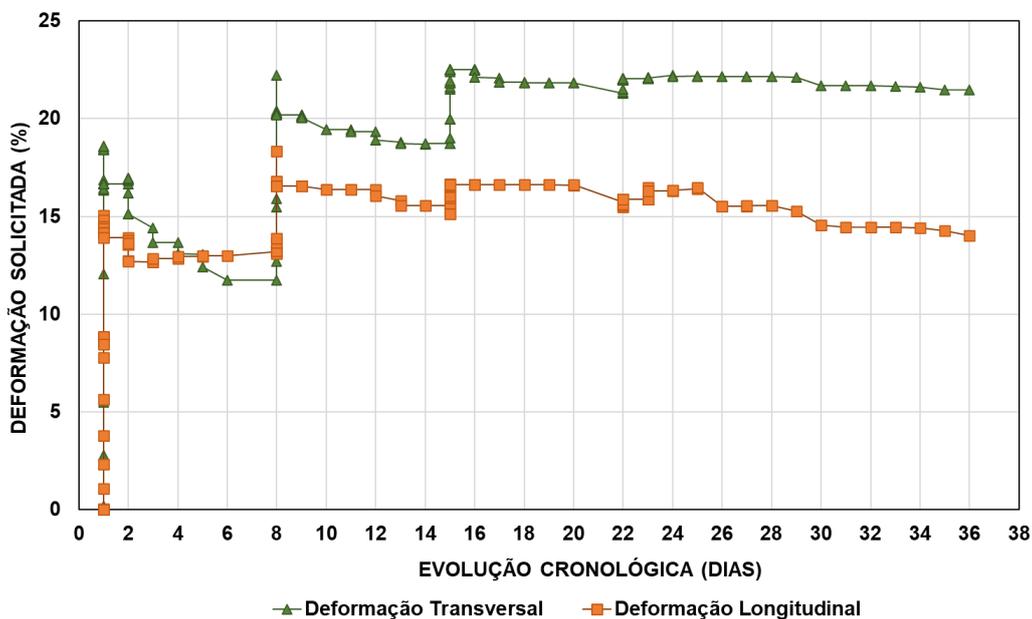
Figura 124 – SCR-S4: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido longitudinal.



É possível perceber o mesmo comportamento do sentido transversal para o longitudinal: nos enchimentos SCR-S2 e SCR-S3 há uma discordância temporal entre máxima tração mobilizada e altura máxima, destacada por um círculo vermelho nas Figuras 122 e 123.

A fim de entender o comportamento entre enchimentos, a Figura 125, resume as deformações mobilizadas nos sentidos transversal e longitudinal ao longo de todos os enchimentos e durante o período inicial de consolidação. É possível perceber, assim como mostra a Figura 120, a retração do geotêxtil durante os desaguamentos. A inclinação de uma reta imaginária que interligasse os dados nestes períodos fica cada vez mais suave entre ciclos. O comportamento das deformações longitudinais acompanha o comportamento das transversais, com exceção do primeiro desaguamento, em que a partir do quarto dia, a deformação longitudinal supera a transversal.

Figura 125 – Deformações mobilizadas nos sentidos transversal e longitudinal ao longo de todos os enchimentos e durante o período inicial de consolidação do SCR-S.



Fonte: a autora.

Palmerton (2002) apresentou em seu trabalho a relação de 0,63 entre tração longitudinal e tração circunferencial. Aplicando esta relação nos valores 6,32; 6,51 e 6,93 kN/m respectivamente encontrados para tração circunferencial pelos métodos Plaut e Suherman (1998), Cantré e Saathoff (2011) e Guo *et al.* (2014), temos: 3,98;

4,10 e 4,37 kN/m. Estes valores são maiores que o resultado encontrado em campo de 3,35 kN/m.

A Tabela 31 apresenta a tração longitudinal encontrada para mínima e máxima altura de cada enchimento e calcula a relação entre esta e a tração circunferencial. Repare que para todos os enchimentos, com exceção do primeiro, a relação foi maior que 0,73 e que quanto menor a altura de enchimento, maior a relação.

Tabela 31 – Apresentação dos dados de tração longitudinal coletados em campo para o SCR-S e comparação com a tração circunferencial.

Enchimento	Altura	Tração Longitudinal	Relação
	<i>m</i>	<i>kN/m</i>	$T_{\text{longitudinal}}/T_{\text{circunferencial}}$
SCR-S1	0,00	-	-
	1,52	3,35	0,48
SCR-S2	0,33	5,27	1,37
	1,33	7,42	0,85
SCR-S3	0,45	6,07	0,86
	1,29	6,51	0,76
SCR-S4	0,67	6,21	0,75
	1,312	6,30	0,73

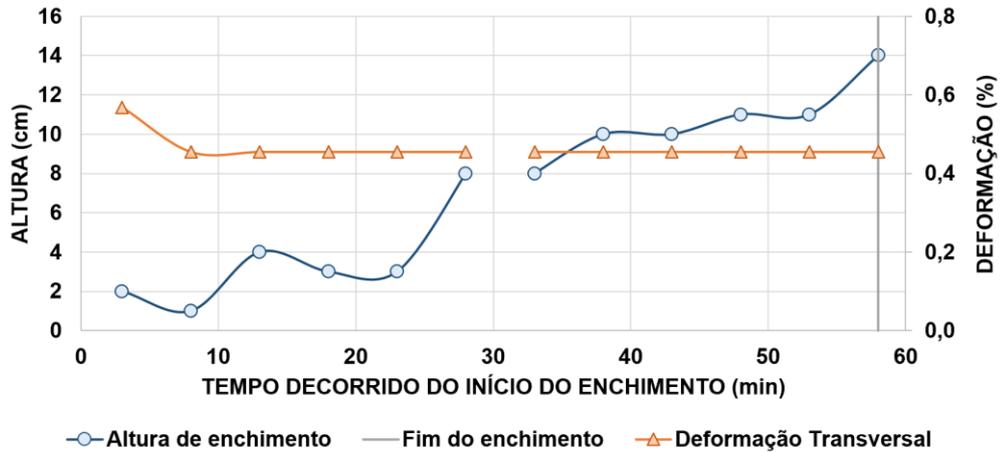
Fonte: a autora.

#### 4.4.2 Deformação mobilizada – SCR-C

As Figuras 126 a 130, apresentam respectivamente, a deformação mobilizada no sentido circunferencial para cada trecho ao longo dos enchimentos SCR-C1 a SCR-C5 coletadas através do encoder.

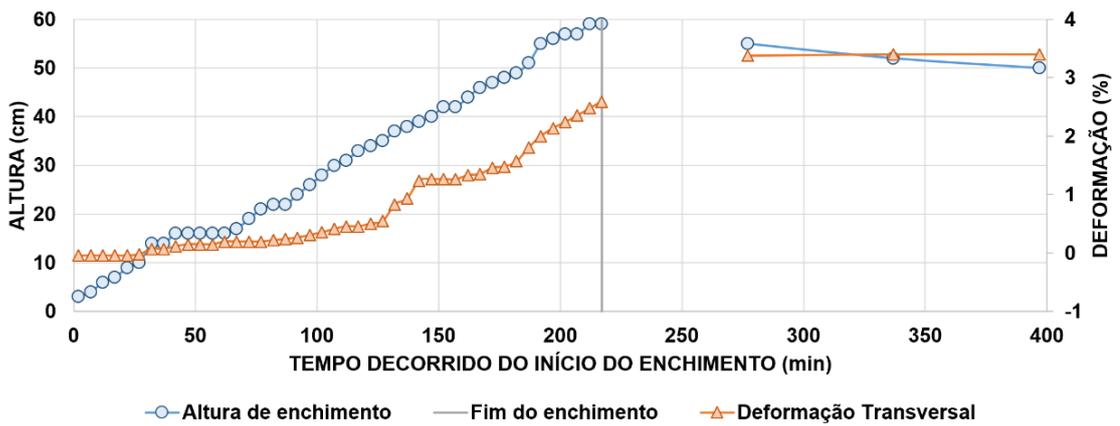
A linha vertical em cinza nos gráficos indica o momento em que o enchimento foi encerrado, desligando a bomba e iniciando o deságue.

Figura 126 – SCR-C1: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial



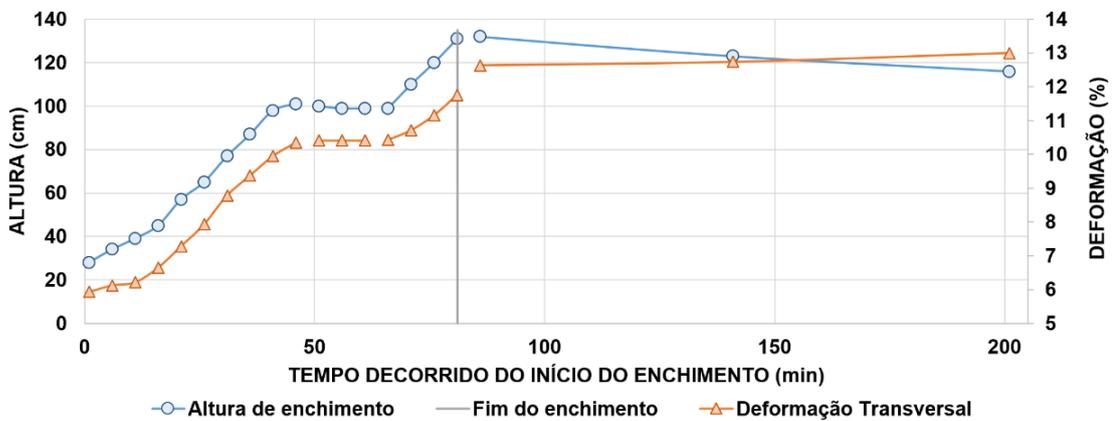
Fonte: a autora.

Figura 127 – SCR-C2: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial.



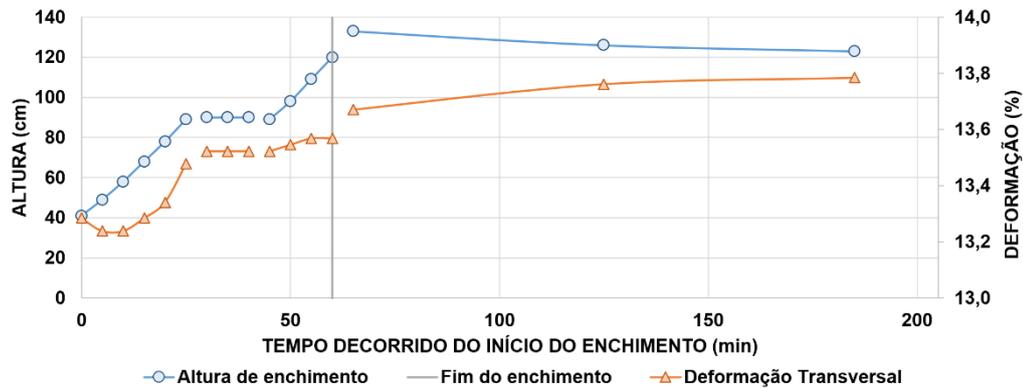
Fonte: a autora.

Figura 128 – SCR-C3: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial.



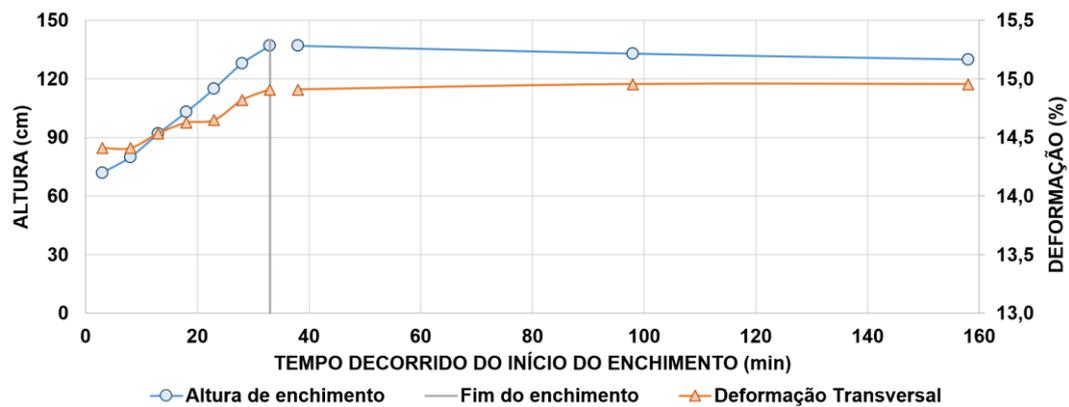
Fonte: a autora.

Figura 129 – SCR-C4: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial.



Fonte: a autora.

Figura 130 – SCR-C5: deformação mobilizada de acordo com a altura de enchimento - sentido circunferencial.



Fonte: a autora.

É possível perceber que as deformações máximas são concordantes com o momento da altura máxima de enchimento e possuem comportamento crescente até o momento em que a bomba foi desligada. Devido à baixa altura de enchimento atingida no SCR-C1, não foi possível identificar deformações significativas no geotêxtil.

Com a intenção de comparar os valores de deformação obtidos com os modelos analíticos, para o SCR-C3 foram calculados para a altura máxima de enchimento, a tração circunferencial, o perímetro final e a deformação através da metodologia de Cantré e Saathoff (2011) apresentados na Tabela 32. Para as metodologias de Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014), utilizando  $H=1,32\text{m}$ , os resultados para tração circunferencial encontrados foram respectivamente 4,84 e 4,33 kN/m.

Tabela 32 – Resultados obtidos do código de programação para o método de Cantré e Saathoff. Parâmetros de entrada:  $L_0 = 9,20$  m,  $Y = 10,01$  kN/m<sup>3</sup>,  $H = 1,32$  m,  $v_1 = 0,5$  para SCR-C3.

Parâmetros de saída	$J_{in} = 33$ kN/m	$J = 55$ kN/m
Tração circunferencial (kN/m)	4,66	4,73
Perímetro final (m)	10,34	9,89
Deformação (%)	21,2	12,3

Fonte: a autora.

A deformação encontrada em campo pelo encoder foi de 13,2% no sentido circunferencial, muito próxima da prevista pelo método de Cantré e Saathoff (2011) com  $J = 55$  kN/m, de 12,3%. Este dado precisa ser analisado com cautela, pois os métodos consideram que a deformação e, portanto, mobilização da tração, apresenta-se uniforme por todo perímetro da seção transversal, enquanto muitos estudos, como o monitoramento de Guo (2012) e a modelagem de Silva (2019), já comprovaram que este parâmetro não se comporta de maneira uniforme. Portanto, a posição do encoder interfere diretamente na aproximação entre os dados.

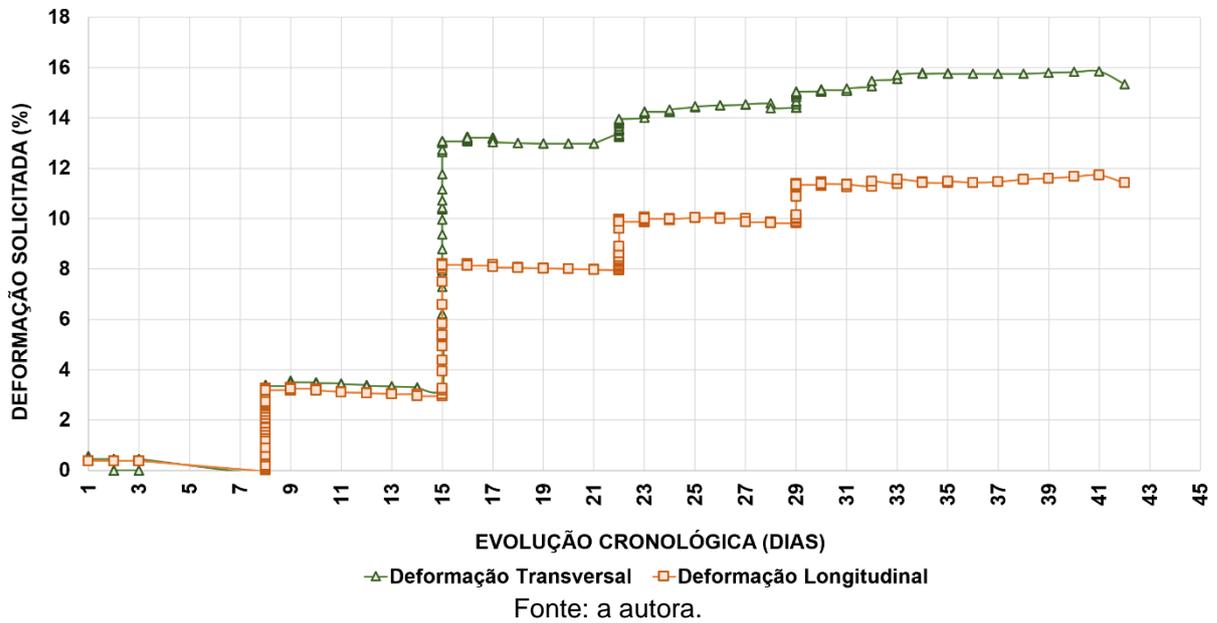
Como os métodos de Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014) consideram que o geotêxtil não se deforma, apenas para comparação da tração circunferencial encontrada, temos que o resultado por Cantré e Saathoff (2011) é intermediário entre os de Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014). A boa aproximação entre os resultados se deve ao baixo aumento do perímetro, como discutido no item 4.1.3.

A fim de entender o comportamento entre enchimentos, a Figura 131, apresenta as deformações mobilizadas nos sentidos transversal e longitudinal ao longo de todos os enchimentos e durante o período inicial de consolidação.

Fica claro na Figura 131 o comportamento contínuo da deformação mobilizada, que ganha intensidade com os enchimentos: do momento de parada do bombeamento até o próximo enchimento, a deformação mobilizada se mantém constante, voltando a aumentar quando religada a bomba no próximo enchimento.

A deformação mobilizada no sentido longitudinal apresentou o mesmo comportamento contínuo e crescente do sentido transversal (motivo pelo qual não foram apresentados os gráficos individuais por enchimento para a deformação longitudinal do SCR-C), entretanto, curiosamente em relação a intensidade, nos enchimentos SCR-C1 e SCR-C2, em que as alturas de enchimento se mantiveram baixas, seus valores foram maiores que o sentido transversal, comportamento este superado a partir do SCR-C3.

Figura 131 – Deformações mobilizadas nos sentidos circunferencial e longitudinal ao longo de todos os enchimentos e durante o período inicial de consolidação do SCR-C.



Palmerton (2002) apresentou em seu trabalho a relação de 0,63 entre tração longitudinal e tração circunferencial. Aplicando esta relação nos valores 4,84; 4,73 e 4,33 kN/m respectivamente encontrados para tração circunferencial pelos métodos Plaut e Suherman (1998), Cantré e Saathoff (2011) e Guo *et al.* (2014), temos: 3,05; 2,98 e 2,73kN/m. Estes valores são menores que o resultado encontrado em campo de 3,09 kN/m.

A Tabela 33 apresenta a tração longitudinal encontrada para a máxima altura de cada enchimento e calcula a relação entre esta e a tração circunferencial. Repare que para todos os enchimentos a relação foi maior que 0,71.

Tabela 33 – Apresentação dos dados de tração longitudinal coletados em campo para o SCR-C e comparação com a tração circunferencial.

Enchimento	Altura máxima <i>cm</i>	Tração Longitudinal <i>kN/m</i>	Relação $T_{\text{longitudinal}}/T_{\text{circunferencial}}$
SCR-C1	14	0,55	2,89
SCR-C2	59	1,49	1,33
SCR-C3	132	3,09	0,71
SCR-C4	133	3,67	0,78
SCR-C5	137	4,13	0,78

Fonte: a autora.

O monitoramento das propriedades mecânicas do SCR-C também foi realizado através do LIDAR. As Tabelas 34 a 38, apresentam respectivamente, a deformação mobilizada para cada trecho ao longo dos enchimentos SCR-C1 a SCR-C5 coletadas com o LIDAR.

Devido as restrições práticas de campo, como ponto de posicionamento do LIDAR, ângulo de leitura e fixação das marcações, apenas meia face superior do SCR-C foi monitorada, como apresentado em “3.11.1 Pontos de referência para dados do LIDAR”.

Buscou-se com esse monitoramento, localizar os trechos mais solicitados ao longo do perímetro, a fim de entender o comportamento da deformação circunferencial.

Com exceção do SCR-C1, em que o enchimento se manteve com baixas alturas e, portanto, com baixos níveis de solicitação, é possível perceber pela escala de cores que os valores tendem a aumentar quanto maior a altura de enchimento e mais próximo o trecho está da costura. Mais especificamente, os trechos 6-5 e 2-1 são os mais solicitados.

Tabela 34 – Deformação mobilizada para cada trecho em função da altura ao longo do enchimento SCR-C1.

Enchimento	Trecho	9 - 8	8 - 7	7 - 6	6 - 5	5 - 4	4 - 3	3 - 2	2 - 1
		Deformação mobilizada (%)							
SCR-C1	21	1,5	2,5	0,1	1,8	0,5	0,9	1,3	0,1
	50	0,8	2,5	0,1	2,6	-0,3	0,9	1,3	0,1
	67	0,4	2,1	0,9	2,2	0,1	0,9	0,9	0,1
	82	1,5	2,1	1,7	1,8	-0,7	1,3	0,9	-0,3
	111	-0,4	2,1	0,5	3,4	-0,3	1,3	0,1	-0,3
	130	0,4	2,1	0,5	3,0	0,1	1,3	0,5	-0,3
	145	1,9	0,9	0,9	3,0	-0,3	0,9	0,5	0,1
	165	1,5	1,3	0,5	3,0	0,1	0,0	1,7	0,1

Legenda Menor valor da Tabela  Maior valor da Tabela

Fonte: a autora.

Tabela 35 – Deformação mobilizada para cada trecho em função da altura ao longo do enchimento SCR-C2.

Enchimento	Trecho Altura	9 - 8	8 - 7	7 - 6	6 - 5	5 - 4	4 - 3	3 - 2	2 - 1
		Deformação mobilizada (%)							
SCR-C2	18	-2,7	0,1	1,3	1,0	-0,3	0,9	-1,5	-0,3
	107	-2,3	0,5	1,3	1,0	-0,3	0,9	-1,5	0,5
	179	-2,3	1,3	1,7	1,4	-0,3	1,7	0,1	0,9
	246	-2,3	1,7	0,9	1,4	-0,3	1,7	0,9	1,8
	309	-2,3	2,5	1,7	1,4	0,1	1,7	0,9	3,4
	366	-2,3	2,9	1,7	1,8	0,1	2,9	1,3	3,4
	435	-2,3	2,9	1,7	4,2	1,3	2,9	2,5	3,4
	503	-2,3	2,9	1,7	4,2	1,7	2,9	3,8	3,4
	576	-1,9	2,9	1,7	4,6	2,4	5,0	4,2	3,4
	621	-1,9	2,9	1,7	4,6	2,4	5,0	4,6	3,8

Legenda Menor valor da Tabela  Maior valor da Tabela

Fonte: a autora.

Tabela 36 – Deformação mobilizada para cada trecho em função da altura ao longo do enchimento SCR-C3.

Enchimento	Trecho Altura	9 - 8	8 - 7	7 - 6	6 - 5	5 - 4	4 - 3	3 - 2	2 - 1
		Deformação mobilizada (%)							
SCR-C3	258	0,0	3,8	1,3	4,2	2,1	2,1	2,5	3,0
	320	0,0	3,8	1,3	5,0	3,6	3,3	2,5	3,4
	374	0,0	3,8	1,3	3,4	4,0	3,3	2,9	4,3
	438	0,0	3,8	1,7	3,4	4,0	3,7	3,8	5,5
	530	0,0	3,8	1,7	3,8	4,0	3,7	4,2	5,5
	633	0,8	4,2	2,1	4,6	4,0	5,4	5,4	5,5
	729	2,3	5,0	2,9	4,6	4,0	5,8	5,8	5,5
	838	2,3	5,0	3,3	5,0	5,9	6,2	5,8	6,3
	935	3,1	5,4	3,7	6,2	6,3	6,6	5,8	6,7
	1038	4,3	5,4	4,5	6,2	6,3	7,0	5,4	7,6
	1196	5,0	5,8	4,9	7,8	7,9	7,4	6,2	8,8
	1312	5,8	6,7	6,1	9,8	9,1	7,8	7,8	10,1

Legenda Menor valor da Tabela  Maior valor da Tabela

Fonte: a autora.

Tabela 37 – Deformação mobilizada para cada trecho em função da altura ao longo do enchimento SCR-C4.

Enchimento	Trecho Altura	9 - 8	8 - 7	7 - 6	6 - 5	5 - 4	4 - 3	3 - 2	2 - 1	
		Deformação mobilizada (%)								
SCR-C4	360	4,3	5,0	5,3	5,8	7,1	7,8	7,0	8,8	
	524	5,0	5,4	5,7	6,6	7,1	8,2	7,4	9,2	
	718	5,4	5,8	6,5	7,0	7,5	9,1	7,4	9,7	
	884	6,2	6,7	7,3	7,4	7,9	9,1	7,4	10,1	
	1008	6,2	7,1	7,3	8,6	8,3	9,1	8,2	10,5	
	1216	6,6	7,1	7,7	9,8	8,7	9,5	8,2	10,9	
	1309	6,6	7,9	8,9	10,2	8,7	9,9	8,2	11,3	
Legenda	Menor valor da Tabela									Maior valor da Tabela

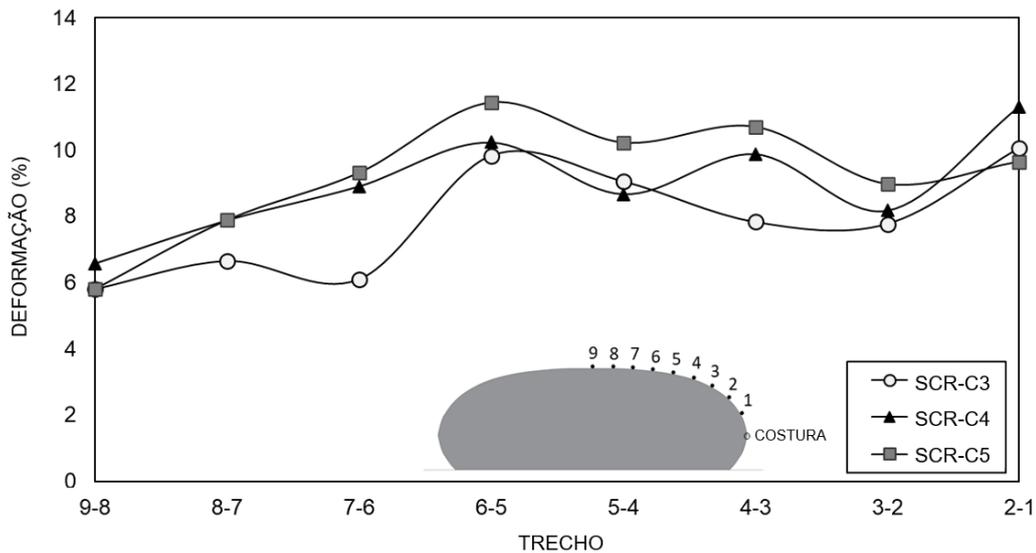
Fonte: a autora.

Tabela 38 – Deformação mobilizada para cada trecho em função da altura ao longo do enchimento SCR-C5.

Enchimento	Trecho Altura	9 - 8	8 - 7	7 - 6	6 - 5	5 - 4	4 - 3	3 - 2	2 - 1	
		Deformação mobilizada (%)								
SCR-C5	566	5,4	6,2	7,7	8,6	7,1	10,7	8,6	11,7	
	655	5,4	6,2	8,1	9,4	7,5	10,7	8,6	11,7	
	734	5,4	6,2	8,1	8,2	8,3	10,7	9,0	11,3	
	831	5,8	6,2	8,1	8,2	8,7	10,3	9,0	11,3	
	942	5,8	6,2	8,5	8,6	9,5	10,3	9,0	11,3	
	1062	5,8	7,1	8,5	8,6	9,5	10,3	9,0	10,9	
	1183	5,8	7,1	8,9	11,0	9,8	10,3	9,0	9,7	
	1349	5,8	7,9	9,3	11,4	10,2	10,7	9,0	9,7	
Legenda	Menor valor da Tabela									Maior valor da Tabela

A Figura 132 apresenta os dados dos enchimentos coletados com o LIDAR para SCR-C3 a SCR-C5 por trechos para as máximas alturas de enchimento.

Figura 132 – Dados dos enchimentos coletados com o LIDAR para SCR-C3 a SCR-C5 apresentados por trechos para as máximas alturas de enchimento.



Fonte: a autora.

Comparando estes dados com os apresentados na Figura 35 do trabalho de Silva (2019) para o trecho Zi (topo) a Zc (lateral), que corresponde ao quarto superior do tubo geotêxtil monitorado (equivalente ao monitoramento dos trechos 9-8 a 2-1, respectivamente), temos comportamentos divergentes: enquanto o trabalho de Silva (2019) mostra que as solicitações (em termos de tração) se mantêm constante entre Zi e Zc, o monitoramento pelo LIDAR mostra uma tendência de aumento da intensidade da deformação, e conseqüente tração, mobilizada entre 9-8 (topo) até 6-5, e então variações mais leves entre 6-5 e 2-1 (lateral).

É importante ressaltar que estas diferenças podem ter inúmeras fontes, as quais são difíceis de rastrear apenas com os dados apresentados, podendo ser oriundas do tipo de geotêxtil utilizado (tecido, por Silva (2019) e não tecido neste trabalho), das condições de bombeamento, da geometria do tubo, do peso específico do material, entre tantas outras variáveis. Entretanto, a diferença entre um material mais deformável e um mais rígido poderia ser a explicação mais plausível: com a zona de maior solicitação se deformando, a solicitação não é transmitida com a mesma intensidade para as outras regiões do geotêxtil. Os dados encontrados estão próximos a distribuição apresentada por Lawson (2008), que apresenta que a magnitude da tensão circunferencial em torno de um tubo de geotêxtil preenchido é uma função da curvatura do geotêxtil, com a maior tensão coincidindo com a localização de maior curvatura, o que ocorre na região lateral dos tubos preenchidos.

A Tabela 39 resume as deformações máximas encontradas pelo LIDAR no trecho 2-1 e a deformação total do perímetro calculada através de  $(L_f - L_0)/(L_0 - B)$ , onde  $L_0$  é 9,20 m. É curioso notar que a deformação do perímetro fica em torno de metade da deformação máxima localizada encontrada pelo LIDAR.

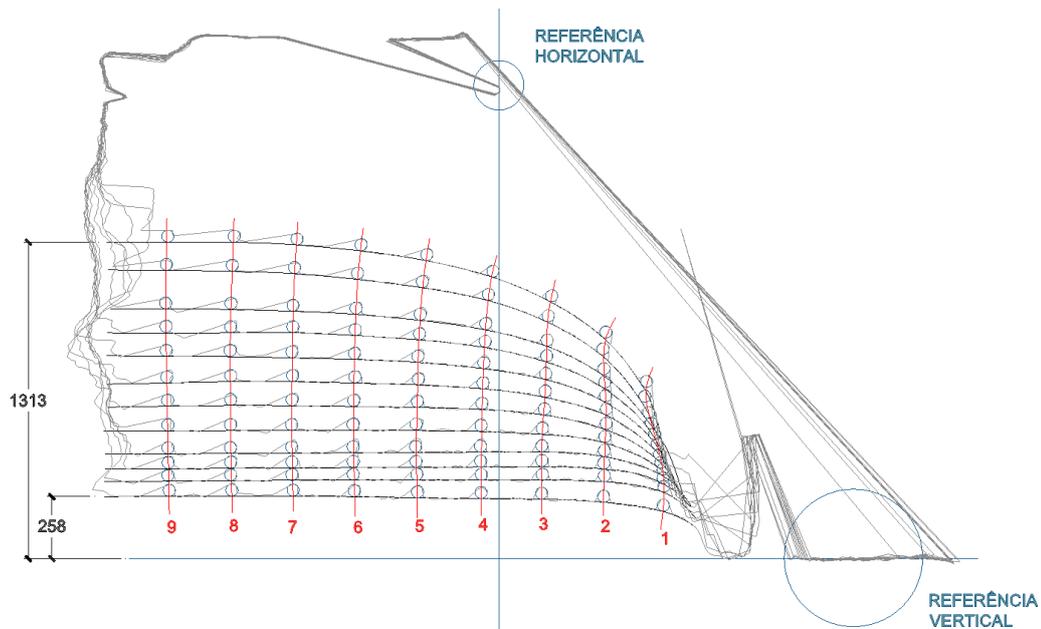
Tabela 39 – Deformação do trecho 2-1 coletada pelo LIDAR e deformação total do perímetro (dado calculado).

	SCR-C2	SCR-C3	SCR-C4	SCR-C5
Def <sub>2-1</sub> [%]	3,8	10,1	11,3	11,7
Def <sub>total</sub> [%]	0	4,6	5,8	6,5

Fonte: a autora.

A Figura 133 indica, em vermelho, as trajetórias percorridas por cada referência de trecho para SCR-S3, onde é possível visualizar que as marcações 1, 4 e 5 são as que mais se movimentam e que por 1 e 5 complementarem seus trechos com 2 e 6, que se mantiveram praticamente alinhadas, justificam os trechos 6-5 e 2-1 serem os mais solicitados.

Figura 133 – Trajetórias percorridas pelas referências de trechos durante o enchimento SCR-C3.

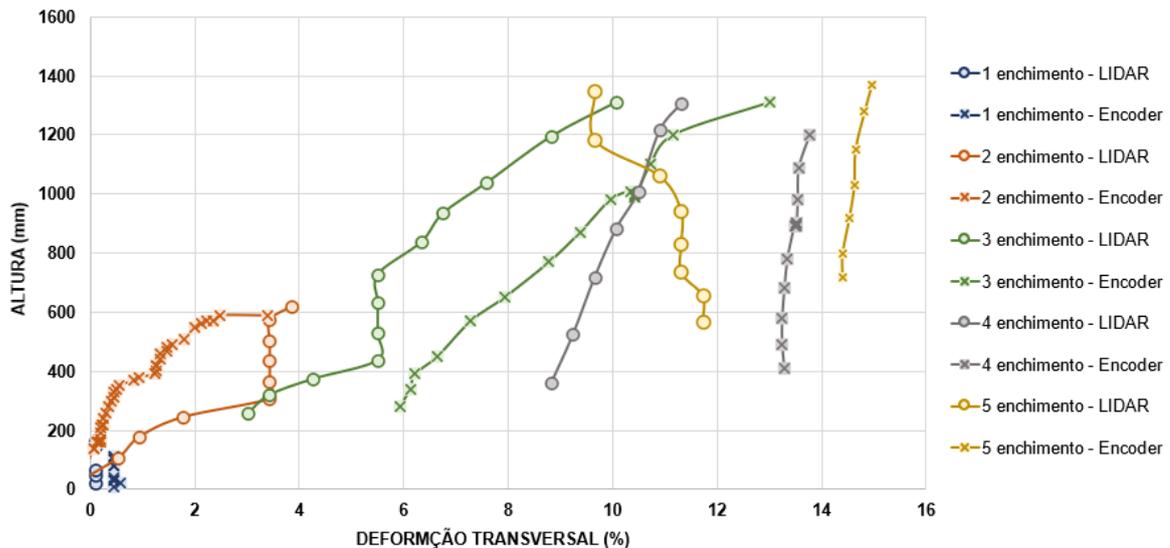


Fonte: a autora.

Tendo o trecho 2-1 os níveis de solicitação mais elevadas, entende-se que a escolha de instalar os encoders de deslocamento em posição equivalente a este trecho foi acertada. Assim, o gráfico da Figura 134 foi traçado no intuito de se comparar os valores coletados através das duas tecnologias.

Nota-se que os valores obtidos com o LIDAR sempre apresentam menor magnitude que os valores obtidos com o encoder. Acredita-se que esta diferença se deva pela metodologia utilizada pelos equipamentos, já que o encoder tende a analisar uma região pontual do tubo geotêxtil e o LIDAR, faz a leitura da movimentação das referências e não diretamente do geotêxtil.

Figura 134 – Comparação dos dados coletados para o trecho 2-1 através dos equipamentos LIDAR e encoder.



#### 4.4.3 Pressão de bombeamento

Pela metodologia de Guo *et al.* (2014), os valores da pressão de bombeamento seriam nulas para todas as alturas máximas atingidas nos enchimentos, com exceção do SCR-S1, com valor de 1,57 kPa. Nos demais enchimentos, a metodologia resulta em haver no interior do tubo geotêxtil apenas pressão hidrostática.

Pela metodologia de Plaut e Suherman (1998), foram encontrados os valores apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 – Pressões atuantes no tubo geotêxtil pela metodologia de Plaut e Suherman (1998).

<b>Enchimento</b>	<b>Altura máxima</b> <i>cm</i>	<b>P<sub>bot</sub></b>	<b>P<sub>total</sub></b> <i>kPa</i>	<b>P<sub>hidrostática</sub></b> <i>kPa</i>	<b>P<sub>bombeamento</sub></b> <i>kPa</i>
SCR-S1	152,23	0,18	16,72	15,12	1,59
SCR-S2	132,9	0,15	13,98	13,19	0,79
SCR-S3	128,5	0,15	13,43	12,76	0,67
SCR-S4	131,12	0,15	13,70	13,05	0,66
SCR-C3	132	0,152	13,89	13,12	0,77
SCR-C4	133	0,15	14,02	13,22	0,80
SCR-C5	137	0,16	14,53	13,60	0,93

Fonte: a autora.

É possível analisar pelos dados apresentados que a pressão de bombeamento considerada dentro do tubo geotêxtil pelas metodologias, com exceção do SCR-S1, não ultrapassa 1 kPa.

Entende-se que a pressão pelo bombeamento passa a influenciar no enchimento quando, após o desaguamento estar em déficit com a vazão de entrada, ficando, portanto, acumulado volume no interior do tubo geotêxtil e esse volume estar gerando uma pressão hidrostática no geossintético, em equilíbrio com o formato da seção, um maior volume continua sendo bombeado para dentro do tubo, gerando um aumento da pressão interna. Esse delta seria considerado como sendo a pressão de bombeamento. Entretanto, para tubos geotêxteis não tecidos, a altura máxima de enchimento é limitada em valores que mantêm a seção em um formato achatado, não permitindo que a pressão de bombeamento tenha efeito considerável.

Se comparamos a ordem de grandeza de 1 kPa no interior do tubo geotêxtil com a pressão estimada na entrada do tubo, de 64,4 kPa para SCR-S e 44,6 kPa para SCR-C, poderíamos considerar que a pressão com a qual o resíduo é bombeado teria pouca importância no dimensionamento para tubos geotêxteis não tecidos, pois o material é poroso e a pressão se dissipa em quase sua totalidade (de 64,4 ou 44,6 kPa para 1 kPa) e que, quando o volume começa a acumular no interior do tubo e então a pressão de bombeamento passaria a ter efeito no formato da seção, o enchimento é encerrado pelo limite de altura. É preciso ter cuidado, entretanto, com o processo de colmatação do geotêxtil, que pode elevar a pressão interna rapidamente ao não dissipar a pressão por entupimento dos poros, levando a um aumento abrupto da altura de enchimento.

#### 4.4.4 Degradação do geotêxtil

As Tabelas 41 e 42 mostram os resultados dos ensaios de tração faixa larga, normatizado pela ABNT NBR ISO 10.319 (ABNT, 2013b) realizados em amostras exumadas do SCR-S e SCR-C, respectivamente.

Para o SCR-S não foi possível coletar a amostra central do geotêxtil inferior, devido a operação de remoção do tubo geotêxtil, que danificou totalmente o material, fato que não ocorreu para o SCR-C. A amostra da borda longitudinal – geotêxtil superior do SCR-C foi coletada no local do monitoramento, a fim de se ter amostragem coerente com as leituras realizadas. Cada resultado da Tabela 41 foi obtido a partir de 5 corpos de prova, sendo apresentado o valor médio e o coeficiente de variação, assim como a amostra virgem. Para Tabela 42, foram ensaiados 3 corpos de prova para cada resultado.

Tabela 41 – Resultados do ensaio de tração em amostras coletadas na data de retirada do SCR-S, todas do geotêxtil superior do tubo.

Local	Sentido	Valor médio (kN/m)	Coeficiente de variação	% amostra intacta
Amostra virgem	Longitudinal	28,02	7,84	100
	Transversal	34,94	3,81	100
Borda Transversal – Geotêxtil superior	Longitudinal	24,66	7,24	88
	Transversal	30,61	12,32	88
Borda Longitudinal – Geotêxtil superior	Longitudinal	24,60	7,58	88
	Transversal	32,02	6,47	92
Centro – Geotêxtil superior	Longitudinal	24,92	14,08	89
	Transversal	30,06	7,11	86

Fonte: a autora.

Tabela 42 – Resultados do ensaio de tração em amostras coletadas na data de retirada do SCR-C.

Local	Sentido	Valor médio (kN/m)	Coefficiente de variação	% amostra intacta
Amostra virgem	Longitudinal	28,02	7,84	100
	Transversal	34,94	3,81	100
Borda Transversal – Geotêxtil superior	Longitudinal	27,75	5,25	99
	Transversal	28,93	2,10	83
Borda Longitudinal – Geotêxtil superior	Longitudinal	25,68	5,42	92
	Transversal	32,68	9,52	94
Centro – Geotêxtil inferior	Longitudinal	26,31	2,53	94
	Transversal	30,34	4,96	87
Centro – Geotêxtil superior	Longitudinal	25,00	5,47	89
	Transversal	32,68	6,97	94

Fonte: a autora.

O ponto mais crítico encontra-se localizado na região onde foi realizado o monitoramento no SCR-C, tendo retido 83% do valor de referência. Esta foi a região mais solicitada dentre as analisadas

Tomando este como valor de referência, a degradação total de 17% teria sido considerada, ou seja, suprida, no dimensionamento por um fator de redução de 1,20 aplicado sobre a resistência a tração do geotêxtil virgem utilizado para fabricação do tubo geotêxtil, ou seja:

$$T \times 0,83 = \frac{T}{1,20}$$

Vertematti e Castro (2015) apontam alguns fatores para redução da resistência a tração, estando entre eles:

- FRP<sub>DI</sub> – Fator de redução devido a danos de instalação, que, para tubos geotêxteis, geralmente são causados por um aumento imprevisto na pressão de bombeamento;
- FRP<sub>AQ</sub> – Fator de redução devido a exposição a agentes químicos;
- FRP<sub>MA</sub> – Fator de redução devido ao meio ambiente, tais como agentes físicos (radiação UV, variação de temperatura, exposição a chuvas), ou biológicos (presentes no material de preenchimento do tubo geotêxtil, por exemplo).

Além destes, pode-se citar outros fatores de redução como: devido à presença da costura, a aplicação de cargas cíclicas, à fluência do geotêxtil, à variabilidade inerente dos geotêxteis não tecidos. Ao considerar todos estes fatores para compor o fator de redução total, o valor encontrado de 1,20 estaria abaixo do recomendado, indicando que se está a favor da segurança, como esperado para a operação de tubos geotêxteis que envolve risco a vida dos operadores em caso de ruptura.

Também foi realizado nas amostras coletadas ensaio de permissividade. Na Tabela 43, são apresentados os valores encontrados.

Tabela 43 – Resultados do ensaio de permissividade em amostras exumadas dos SCR-S e SCR-C.

Local	Permissividade ( $s^{-1}$ )			
	SCR-S		SCR-C	
	Valor médio	Coefficiente de variação	Valor médio	Coefficiente de variação
Borda Transversal – Geotêxtil superior	0,44	11,81	0,77	28,56
Borda Longitudinal – Geotêxtil superior	0,68	18,62	0,54	12,14
Centro – Geotêxtil superior	0,83	5,34	0,14	31,07
Centro – Geotêxtil inferior	-	-	0,06	70,05

Fonte: a autora.

É possível analisar dos dados apresentados que a amostra coletada da face inferior do SCR-C é a que apresenta menor permissividade, o que já era esperado devido ao fato dessa região ser a que sofre maior pressão de coluna de material durante toda a vida útil do tubo geotêxtil, estando mais propensa a colmatação e, conseqüentemente, a redução das propriedades hidráulicas.

O SCR-S apresenta valores mais coerentes se analisarmos que o a parte central superior foi a que manteve maior permissividade, já que teoricamente, é a região com menor fluxo. As laterais apresentam valores semelhantes.

#### 4.5 ANÁLISES COMPARATIVAS ENTRE SCR-S E SCR-C

A ausência de um tanque de equalização gerou uma grande variabilidade no lodo de entrada durante as descargas dos decantadores. Para o SCR-S, a influência dessa variação não foi sentida na operação, pelo bombeamento ser realizado de forma direta. Não se pode dizer o mesmo para o SCR-C, em que o processo de

floculação foi totalmente afetado pela constante variação do teor de sólidos e, conseqüentemente, da dosagem necessária de polímero floculante.

O volume bombeado total para o SCR-C foi menor que o volume do SCR-S, entretanto, o volume de sólidos retidos no interior do tubo foi 33 % maior, fato este justificado pelo teor de sólidos do lodo bombeado, que era 70% maior do que do SCR-S.

As vazões de saída foram curiosamente mais baixas para o SCR-C em relação ao SCR-S durante o bombeamento. A Tabela 44 mostra dois grandes picos para os SCR-S1 e SCR-S2, maiores que 20 l/s, e uma queda para os SCR-S3 e SCR-S4, que ficaram abaixo de 7 l/s, comportamento este que não se repete para o SCR-C, onde é possível encontrar os todos os picos entre 3 e 6 l/s, indicando que o uso do polímero floculante influencia diretamente no comportamento do desaguamento, trazendo uma maior estabilidade ao sistema frente a formação do *filter cake* e colmatação do geotêxtil.

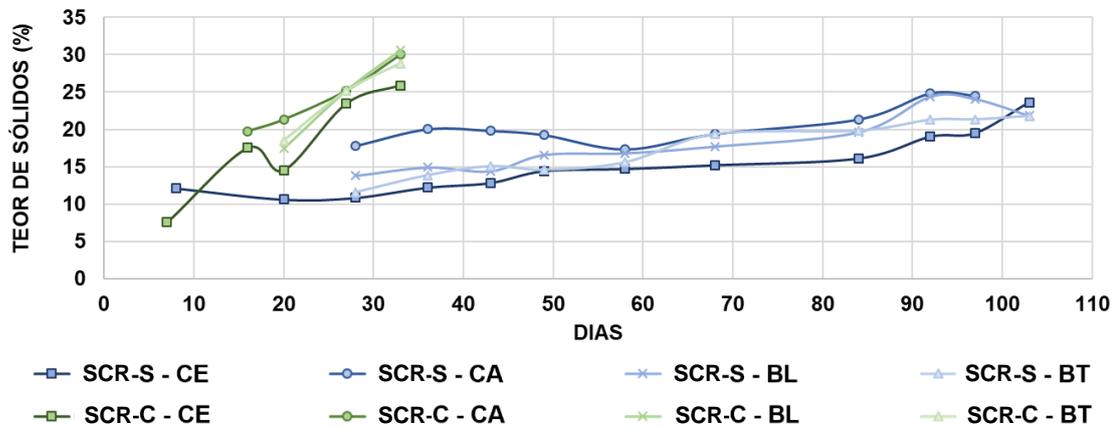
Tabela 44 – Vazão de pico em l/s por enchimento para SCR-S e SCR-C.

Enchimento	SCR-S	SCR-C
1	22,0	4,2
2	20,8	3,2
3	6,5	5,8
4	3,5	5,8
5	-	4,25

Fonte: a autora.

Analisando a etapa de consolidação, para o SCR-C, ocorreram mais precipitações do que no SCR-S, com temperaturas máximas mais baixas. Entretanto, pelo fato de possuir polímero floculante adicionado ao lodo, em comparação ao SCR-S que ficou disposto 103 dias para atingir teor de sólidos suficiente para remoção, o SCR-C pode ser removido em um período 3 vezes menor (em 34 dias). Veja o gráfico comparativo apresentado na Figura 135. Este gráfico apresenta compatibilidade com os gráficos da Figura 12 apresentados por Lawson (2008), que comparam a evolução do teor de sólidos com e sem o uso de polímero.

Figura 135 – Comparativo da evolução do teor de sólidos com e sem o uso de polímero flocculante.



Fonte: a autora.

Diferentemente do comportamento presenciado no SCR-S, nos enchimentos do SCR-C os travamentos do encoder com disparo abrupto ocorreram em menor quantidade e intensidade. Notou-se apenas um acréscimo lento nas deformações ao longo do tempo com a manutenção da carga nas primeiras horas após o fim do enchimento, o qual também foi presenciado no SCR-S.

Chama atenção que no SCR-C não foi detectado o comportamento resiliente do material, com distensões e retrações em grande escala nos primeiros enchimentos e acomodação do geotêxtil após alguns ciclos. Acredita-se que a distensão contínua do material se deva ao fato de que os dois primeiros ciclos (SCR-C1 e SCR-C2) o enchimento ocorreu de forma muito lenta, atingindo alturas de enchimento muito inferiores a máxima, o que permitiu ao material ir se acomodando a tensão aplicada. Diferentemente deste processo, nos SCR-S1 e SCR-S2, o enchimento ocorreu de forma acelerada, sendo ainda que no SCR-S1 a altura de enchimento atingida foi a maior dentre todas as alturas de todo monitoramento.

Acredita-se, com base nestes dados, que o processo de enchimento possa influenciar no modo como a deformação ocorre e no comportamento do material (apresentando resiliência ou distensão contínua).

O monitoramento hidráulico apontou diferenças no comportamento do desaguamento com e sem a presença de polímero, que também pode ser um dos fatores que contribui para diferença do comportamento de distensão e retração do geotêxtil ao longo dos ciclos.

## 4.6 COMPARAÇÃO COM ENSAIOS DE APARICIO-ARDILA (2020)

A seguir, serão comparados os dados do desempenho hidráulico dos SCR-S e SCR-C com os resultados obtidos por Aparicio-Ardila (2020) para os ensaios de semi-desempenho.

### 4.6.1 SCR-S

Comparando os dados de desaguamento obtidos com o ensaio de cone sem polímero (cenário 1A) realizados por Aparicio-Ardila (2020), temos que a autora obteve uma taxa de desaguamento de  $0,8 \text{ cm}^3/\text{s}$  e um volume total desaguado de  $1200 \text{ cm}^3$  dos  $2000 \text{ cm}^3$  inseridos no cone, ou seja, 60 % do volume da amostra foi desaguado e 40 % foi retido.

Avaliando que que no SCR-S ficaram retidos 9,5 % do volume bombeado e que podemos considerar os lodos utilizados com o mesmo teor de sólidos (2 %), o ensaio de cone apresentou valores 4 vezes maior de retenção que o ensaio em verdadeira grandeza, ou seja, em campo, obteve-se um melhor desaguamento. Esta diferença era esperada, pois o ensaio de cone é realizado em um curto intervalo de tempo, não havendo o processo de consolidação e espera da evolução do teor de sólidos. Para o ensaio de cone sem uso de polímero, o teor de sólidos final após o desaguamento foi de 3%.

Comparando o ensaio de cone apenas com o desaguamento do SCR-S1, o volume bombeado foi de  $73,9 \text{ m}^3$ , obtendo o desaguamento de  $61,1 \text{ m}^3$  em uma semana, ficando retidos  $12,8 \text{ m}^3$ . Em percentual, temos 83% de volume desaguado e 17% de volume retido. O ensaio de campo, portanto, teve desempenho aproximadamente 2 vezes melhor que o de cone. Isso indica que o ensaio de cone está a favor da segurança, mas que pode ser considerada uma melhoria no desempenho obtido devido ao tempo de deságue em campo até o início do próximo ciclo.

Transformando a taxa de desaguamento  $0,8 \text{ cm}^3/\text{s}$  obtida por Aparicio-Ardila (2020) em  $\text{m}^3/\text{min}$  temos  $0,000048 \text{ m}^3/\text{min}$ . Essa taxa de deságue é representativa de todo o ensaio, com 25min de duração. Entretanto, se utilizarmos o dado da Figura 42, temos aos 5 min uma taxa de deságue de  $0,00016 \text{ m}^3/\text{min}$  e em 1 min,  $0,0005 \text{ m}^3/\text{min}$ . Isso significa que quanto mais próximo do início do ensaio e, portanto, maior a coluna

de lodo dentro do cone, maior a taxa de desaguamento. Estes valores ainda são muito inferiores às vazões de saída durante os ciclos de enchimento do SCR-S, mas a pressão interna aplicada ao desaguamento no ensaio de cone também é. Se relacionarmos esses valores com os momentos pós enchimento, por exemplo, 24 h após o SCR-S1, o tubo encontrava-se com altura de 47cm e taxa de desaguamento de 0,0006 m<sup>3</sup>/min, ou seja, muito similar a taxa de início do teste de cone.

#### 4.6.2 SCR-C

Comparando as taxas de deságue obtidos com o ensaio de cone com polímero (cenários 1B e 1C) e os de bolsa fechada (cenários 1A, 1B e 1C, calculados a partir da Tabela 10) realizados por Aparicio-Ardila (2020), temos a Tabela 45:

Tabela 45 – Taxa de deságue em l/s dos ensaios de semi-desempenho de Aparicio-Ardila (2020).

Tempo (min)	Cenário - Bolsa Fechada			Cenário - Cone	
	1A	1B	1C	1B	1C
1	-	-	-	0,02	0,01
5	4,07	6,33	6,13	0,01	0,00
25	1,43	1,64	1,53	0,00	0,00
60	0,65	0,69	0,65	-	-
120	0,33	0,34	0,33	-	-
1440	0,03	0,03	0,03	-	-

Fonte: a autora.

Da Tabela 45, temos que as taxas de deságue do ensaio de bolsa fechada apresentam uma ótima correlação com o ensaio em verdadeira grandeza, apresentando, inclusive, valores muito semelhantes, o que não ocorre para o ensaio de cone.

Em relação ao volume desaguado, temos em torno de 80% para o ensaio de cone e 96, 84 e 79 % respectivamente para os cenários 1A, 1B e 1C de bolsa fechada. Todos os valores estão de acordo com o ensaio SCR-C, em que o volume desaguado total foi de 85,6% do volume bombeado. É importante lembrar que os ensaios de semi-desempenho possuíam 2% de teor de sólidos e os de verdadeira grandeza, 3,42%.

Fazendo uma análise sobre a etapa de consolidação, para os cenários 1B e 1C do teste de cone, obteve-se os teores de 14,2 e 15,4%, evolução esta condizente com o uso de polímero, que para um mesmo intervalo de tempo, permite a remoção

de maior quantidade de água comparando ao ensaio sem polímero. Já em relação ao ensaio de bolsa fechada, os teores de sólidos atingidos foram em torno de 35%.

Analisando estes resultados em relação ao tempo de exposição, era esperado que o teste de cone não apresentasse valores condizentes com o lodo pós etapa de consolidação no ensaio de verdadeira grandeza, que em contrapartida era esperado para o ensaio de bolsa fechada.

O ensaio de bolsa fechada atingiu 10% a mais em teor de sólidos em relação aos SCR-S e SCR-C. Essa diferença também era esperada, já que 0,03 m<sup>3</sup> de lodo foram desaguados em uma bolsa com superfície média de 0,5 m<sup>2</sup>, resultando em uma relação de 16,67 m<sup>2</sup> para cada 1 m<sup>3</sup> de lodo a ser desaguado no ensaio de bolsa fechada, enquanto no ensaio de verdadeira grandeza, 158 m<sup>3</sup> para SCR-S e 138,46 m<sup>3</sup> para SCR-C, foram desaguados em uma superfície aproximada de 92 m<sup>2</sup>, ou seja, cada 1 m<sup>3</sup> de lodo possuiu uma área menor que 1m<sup>2</sup> para desaguar.

Essa relação da superfície disponível para atuação da energia solar em relação ao volume, é muito importante para permitir que em um menor intervalo temporal, seja obtida uma maior evolução do teor de sólidos por evaporação da água.

As análises de turbidez realizadas por Aparicio-Ardila (2020) para os ensaios de bolsa fechada em comparação aos de campo, resultou em dados semelhantes para os mesmos intervalos de tempo, sendo todos abaixo de 100 UNT (com exceção da amostra 1<sup>a</sup> no tempo 5 minutos). Sobre este parâmetro, o ensaio de bolsa fechada trouxe uma boa correlação com o ensaio de verdadeira grandeza.

A autora também realizou ensaios de permissividade nas amostras coletadas dos ensaios de bolsa fechada. Chama atenção a amostra do cenário 1A com o mesmo valor encontrado para a borda transversal do SCR-C, indicando uma boa correlação com os resultados. Os demais cenários apresentam valores superiores, também condizentes com o ciclo único adotado para o enchimento das bolsas fechadas, o que traz menor impacto as propriedades hidráulicas.

## 5 CONCLUSÕES

Realizar ensaios em verdadeira grandeza foi um grande desafio. Quando não se obteve os resultados esperados com as instrumentações, as modificações precisaram ser muito rápidas, para que causassem o menor dano possível a coleta de dados. De forma geral, o aprendizado em relação as instrumentações do SCR-S fizeram com que o monitoramento do SCR-C fosse muito mais completo.

Por exemplo, em relação a geometria da seção transversal, indica-se o uso do LIDAR como tecnologia mais precisa e confiável para realização de trabalhos futuros e se possível, monitorando meia seção, incluindo a face inferior, de forma a obter resultados mais precisos para largura da base do tubo. Apesar das imprecisões na medida da base, obteve-se boas aproximações entre os dados de campo e teóricos para os dois ensaios (SCR-S e SCR-C).

O monitoramento da seção transversal com o LIDAR também apontou que o geotêxtil superior do tubo se deforma mais que o inferior na seção máxima, o que é justificável pela quantidade de sólidos acumulados na região da base do tubo, que criam um esforço contra o ganho de altura.

As análises volumétricas estabeleceram que o volume de armazenamento do tubo geotêxtil é em torno de 65 a 70% do volume de um paralelepípedo de mesmas dimensões (largura, comprimento e altura), sendo uma boa correlação para pré-dimensionamentos. A modelagem 3D é a mais indicada para obtenção da volumetria precisa do tubo geotêxtil.

Em relação ao monitoramento hidráulico, ficou evidente a importância da instalação de um tanque de equalização para homogeneização do lodo e aplicação de polímero floculante, pois interfere diretamente no desempenho do tubo. Para o ensaio sem polímero, a ausência desta estrutura não trouxe impactos perceptíveis.

O teor de sólidos do lodo sofre grande influência das condições climáticas e da época do ano, o que fez variar os volumes bombeado, desaguado e retido entre os ensaios.

A presença de polímero floculante, apesar da dificuldade de dosagem, influenciou diretamente nas condições de desaguamento e na evolução do teor de sólidos na fase de consolidação. O SCR-C apresentou evolução 3 vezes mais rápida que o SCR-S.

A comparação entre os ensaios de semi-desempenho realizados por Aparicio-Ardila (2020) e os ensaios de campo mostraram uma melhor correlação para os ensaios com adição de polímero floculante, tanto para o ensaio de cone, tanto para o ensaio de bolsa fechada. O ensaio de cone sem polímero não apresentou boas comparações com o SCR-S. Pode-se, portanto, sugerir uma possível influência do processo de formação do *filter cake* em diferentes intensidades entre ensaios, dificultando as comparações de desaguamento.

Em relação ao monitoramento mecânico, conclui-se que o geotêxtil não-tecido se deforma durante os ciclos de enchimento e deságue e as deformações máximas são obtidas concomitantemente com as alturas máximas, nas quais se percebe uma acomodação do material, semelhante ao comportamento de fluência, quando a altura máxima é mantida antes de iniciar o desaguamento.

Para o SCR-S, o monitoramento indicou a capacidade resiliente do material e uma possível perda dessa propriedade ao longo dos enchimentos, o que não foi percebido para SCR-C, em que os níveis de deformação se mantinham praticamente constantes entre o fim de um enchimento e início do próximo. Isso indica que os esforços solicitantes (como por exemplo, a vazão da bomba) e a presença de polímero floculante, podem alterar o comportamento do geotêxtil.

Também foi possível analisar que as deformações no geotêxtil não são uniformes, havendo regiões mais solicitadas do que outras e que sua distribuição é concordante com trabalhos anteriores, como o de Lawson (2008), que apresenta que a magnitude da tensão circunferencial em torno de um tubo de geotêxtil preenchido é uma função da curvatura do geotêxtil, com a maior tensão coincidindo com a localização de maior curvatura, o que ocorre na região lateral dos tubos preenchidos. Para os resultados do LIDAR, por exemplo, a deformação do perímetro total ficou em torno de metade da deformação máxima.

Os métodos analíticos apresentaram boa concordância com os resultados experimentais, indicando a aplicabilidade para o dimensionamento do primeiro ciclo de enchimento dos tubos geotêxteis não-tecidos monitorados. A influência do módulo de elasticidade na análise foi clara e indicou que o método de Cantré e Saathoff pode apresentar bons ajustes se bem avaliados os parâmetros de entrada. Apesar dos métodos de Plaut e Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014) não considerarem a deformação do geotêxtil, como a deformação total do perímetro do tubo para o SCR-C3 foi de 4,6%, os resultados para tração circunferencial se mantiveram próximos

entre todos os métodos e ficaram em torno de 3 vezes menor que a resistência a tração do material.

A análise sobre a pressão de bombeamento indica que esta não tenha efeito considerável sobre os tubos geotêxteis não tecidos, já que a altura máxima de enchimento é limitada em valores que mantêm a seção em um formato achatado.

Na análise das amostras degradadas, o fator de redução de 1,20 encontrado estaria abaixo do recomendado, indicando estar a favor da segurança, para este caso de aplicação.

Conclui-se que as tecnologias de monitoramento utilizadas auxiliaram a entender as variáveis que influenciam na geometria, no comportamento hidráulico e mecânico dos tubos geotêxteis não tecidos aplicados em ETA, sendo a deformação uma peça-chave. As metodologias analíticas escolhidas, trouxeram um bom ajuste aos resultados de campo, sendo o método de Cantré e Saathoff o mais indicado por considerar deformações. O bom desempenho hidráulico dos geotêxteis não tecidos neste tipo de aplicação é uma característica consolidada, que foi verificada neste trabalho. A menor resistência a tração oferecida por este tipo de geotêxtil em relação aos tecidos, não se apresentou como um fator limitante à sua utilização, indicando que seu uso deveria ser mais explorado para o desaguamento de lodos de ETA.

Assim, a aplicação de tubos geotêxteis não tecido em ETA mostrou-se possível, sempre que uma análise criteriosa conclua que seu uso seja viável, como deve ocorrer para todos os tipos de materiais, incluindo os geotêxteis tecidos. Indica-se, para trabalhos futuros, a realização de ensaios em escala real comparando tubos fabricados a partir de geotêxteis tecido e não tecido a fim de entender melhor a distribuição de tensões e permitir uma nova análise de estimativa das tensões para ciclos múltiplos e o comportamento do geotêxtil ao longo do tempo.

## REFERÊNCIAS

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 115-122, 2013. DOI: 10.1590/S1413-41522013000200003.

AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. Aplicação em filtração. *In*: MANUAL Brasileiro de Geossintéticos. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. p. 247-273.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D 2035. Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water** Conshohocken: ASTM International, 2019.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D 7880 Standard Test Method for Determining the Flow Rate of Water and Suspended Solids from a Geotextile Bag**. Conshohocken: ASTM International, 2011.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D3786 Standard Test Method for Bursting Strength of Textile Fabrics: Diaphragm Bursting Strength Tester Method**. Conshohocken: ASTM International, 2001.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D4491 Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity**. Conshohocken: ASTM International, 2015.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D4533 Standard test method for trapezoid tearing strength of geotextiles**. Conshohocken: ASTM International, 2004.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D4595 Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method**. Conshohocken: ASTM International, 2017.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D4751 Standard Test Methods for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile**. Conshohocken: ASTM International, 2020.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D4833 Standard test method for index puncture resistance of geomembranes and related products**. Conshohocken: ASTM International, 2007.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D5199 Standard test method for measuring the nominal thickness of geosynthetics**. Conshohocken: ASTM International, 2012.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **ASTM D5261 Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles**. Conshohocken: ASTM International, 2010.

APARICIO-ARDILA, M. A. **Avaliação de sistemas fechados em geotêxteis não tecidos para o desaguamento de lodo de ETA por meio de ensaios de semi-desempenho**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

APARICIO-ARDILA, M. A. *et al.* Geotextile tube dewatering performance assessment: An experimental study of sludge dewatering generated at a water treatment plant. *Sustainability*, [s. l.], v.12, n. 19, p. 8129, 2020.

APHA; AWWA; WEF. Part 2000 physical & aggregate properties. *In: STANDARD Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23th ed. Washington, DC: [s. n.], 2017. p. 1545. DOI: <https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.216>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12216**: projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12956**: geotêxteis e produtos correlatos - determinação da abertura de filtração característica. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16757-1**: geossintéticos: requisitos para aplicação: parte 1: geotêxteis e produtos correlatos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm: determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10319**: ensaio de tração faixa larga. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10321**: geossintéticos: ensaio de tração de emendas pelo método da faixa larga. Rio de Janeiro: ABNT, 2013c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 11058**: geotêxteis e produtos correlatos: determinação das características de permeabilidade hidráulica normal ao plano e sem confinamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12236**: geossintéticos - ensaio de puncionamento estático (punção CBR). Rio de Janeiro: ABNT, 2013d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 13433:** geossintéticos - Ensaio de perfuração dinâmica (ensaio de queda de cone). Rio de Janeiro: ABNT, 2013e.

AVANCINI, L. L. S. **Análise do desaguamento do lodo de estações de tratamento de água em sistemas de confinamento em geotextil.** 2017. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.

BIDONE, F.; SILVA, A. P.; MARQUES, D. M. Lodos produzidos nas estações de tratamento de água (ETAs): desidratação em leitos de secagem e co-disposição em aterros sanitários. *In: ANDREOLI, C. (org.). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.* Rio de Janeiro: RiMa, p. 215-244.

BIOCICLO. **Relatório de andamento I, II e III do Projeto Centrais de Lodos nas Bacias PCJ.** Campinas: Biociclo, 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. o 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. o 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução no 357. de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá out. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, 2005.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento [...]. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 1-26, 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>. Acesso em: 24 nov. 2020.

BRINK, N. R. **Numerical modeling of consolidation processes in hydraulically deposited soils.** 2014. Boulder: University of Colorado, 2014.

CANTRÉ, S. Geotextile tubes: Analytical design aspects. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 20, n. 5, p. 305-319, 2002. DOI: 10.1016/S0266-1144(02)00029-8.

CANTRÉ, S.; SAATHOFF, F. Design method for geotextile tubes considering strain e Formulation and verification by laboratory tests using photogrametry. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 29, p. 201-210, 2011.

CANTRÉ, S.; SAATHOFF, F. Design parameters for geosynthetic dewatering tubes derived from pressure filtration tests. **Geosynthetics International**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 90-103, 2011. DOI: 10.1680/gein.2011.18.3.90.

CARROLL, R. P. Submerged geotextile flexible forms using noncircular cylindrical shapes. **Geotechnical Fabrics Report**, [s. l.], v. 12, p. 4, 1994.

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

CAZZUFFI, D. *et al.* European experimental approach to the tensile creep behavior of high-strength geosynthetics. *In: GEOSYNTHETICS*, 97th, 1997. **Proceedings**. [California: s. n.], 1997. v. 1, p. 253-266.

CHRISTOPHER, B. R.; FISCHER, G. R. Geotextile filtration principles, practices and problems. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 11, n. 4/6, p. 337-353, 1992. DOI: 10.1016/0266-1144(92)90018-6.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Norma Técnica SABESP NTS 301**: saco geotêxtil para desaguamento de lodo. São Paulo: Sabesp, 2015.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Tratamento de água**. São Paulo, 2020. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=47>. Acesso em: 31 jan. 2020.

CORDEIRO, J. S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. *In: NOÇÕES* gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999. p. 1-18.

CORDEIRO, J. S. Processamento de lodos de estações de tratamento de água (ETAs). *In: ANDREOLI, C. V. (org.). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro: RiMa, 2001. p. 121-142.

CORNWELL, D. A. **Water treatment plant residuals**. 5th ed. Denver: AWWA, 1999.

DASSAULT SYSTEMES. **ABAQUS 6.14**: ABAQUS/CAE user's guide. [S. l.]: DASSAULT SYSTEMES, 2014. Disponível em: [http://130.149.89.49:2080/v6.14/pdf\\_books/CAE.pdf](http://130.149.89.49:2080/v6.14/pdf_books/CAE.pdf). Acesso em: 4 mar. 2021.

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

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe Editora, 2012.

DIDÁTICA SP. **Bomba peristáltica**: vazão 1,2 a 6 litros/hora. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.didaticasp.com.br/bomba-peristaltica-vazao-12-a-6-litros/hora%3E>. Acesso em: 18 fev. 2020.

DUARTE, T. O que há de novo: Allonda desenvolve equipamento inovador para desidratação de lodo. **Fundações e Obras Geotécnicas**, São Paulo, p. 82-87, 2016.

ESTRUTURATTA ENGENHARIA LTDA. **Infraestrutura para tubos geotêxteis**: projeto executivo. Ribeirão Preto: Estrutturatta Engenharia Ltda, 2019.

GAFFNEY, D. A. *et al.* Dewatering contaminated fine-grained material using geotextiles. **SI Geosolutions**, [s. l.], 1999.

GANDARA, G.; BERTON, R. Aproveitamento de lodo de estações de tratamento de água no cultivo do milho. *In*: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 4., 2010, [s. l.]. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2010.

GIROUD, J. P. Poisson's ratio of unreinforced geomembranes and nonwoven geotextiles subjected to large strains. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 22, p. 297-305, 2004.

GRZELAK, M. D. *et al.* Comparison of Test Methods Adopted for Assessing Geotextile Tube Dewatering Performance. *In*: GEO-FRONTIERS 2011, 2011, Reston. **Proceedings [...]**. Reston: American Society of Civil Engineers, 2011. p. 2141-2151. DOI: 10.1061/41165(397)219.

GUIMARÃES, G. **Eficiência do desaguamento de resíduo de estação de tratamento de água em tubo geotêxtil**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2019.

GUO, W. *et al.* Analytical solutions for geosynthetic tube resting on rigid foundation. **Geomechanics and Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 65-77, 2014. DOI: 10.12989/gae.2014.6.1.065.

GUO, W. **Geosynthetic tubes and mats**: Experimental and analytical studies. [S. l.]: Nanyang Technological University, 2012.

HUONG, T. C. **Two-dimensional analysis of water-filled geomembrane tubes used as temporary flood-fighting devices**. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa nacional de saneamento básico 2017**: abastecimento de água e esgotamento sanitário. Rio de Janeiro: IBGE, 2020

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INTERNATIONAL GEOSYNTHETICS SOCIETY – IGS BRASIL. **Recomendação 004**: aplicação de geossintéticos em áreas de disposição de resíduos. [S. l.]: IGS Brasil, 2016.

ISOIL INDUSTRIA. **Electromagnetic flowmeters**: Water is precious: Every drop counts. [S. l.], 2020. Disponível em: [http://archivio.isoil.eu/Brochure/ISOMAG\\_Brochure\\_EN.pdf](http://archivio.isoil.eu/Brochure/ISOMAG_Brochure_EN.pdf). Acesso em: 19 fev. 2020.

JACOMASSI, F. E. **Estudo das micropropriedades de resíduos sólidos gerados nos decantadores de estações de tratamento de água**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

KAZIMIEROWICZ, K. Simple analysis of deformation of sandsausages. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 5., 1994, Singapore. **Proceedings** [...]. Singapore: [s. n.], 1994. p. 775-778.

KHACHAN, M. M. *et al.* Cationic starch flocculants as an alternative to synthetic polymers in geotextile tube dewatering. **Geosynthetics International**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 119-136, 2014. DOI: 10.1680/gein.14.00003.

KHIARI, B. *et al.* Analytical study of the pyrolysis process in a wastewater treatment pilot station. **Desalination**, [s. l.], v. 167, n. 1/3, p. 39/47, 2004. DOI: 10.1016/j.desal.2004.06.111.

KIM, H. J. *et al.* Numerical and field test verifications for the deformation behavior of geotextile tubes considering 1D and areal strain. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 209-218, 2016.

KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**. 6th ed. [S. l.]: Xlibris US, 2016.

KURODA, E. K. *et al.* Drenagem/secagem de lodo de decantadores de ETAs em manta geotêxtil. **Revista DAE**, [s. l.], v. 62, n. 194, p. 24-35, 2014. DOI: 10.4322/dae.2014.002.

LAST MINUTE ENGINEERS. **How HC-SR04 Ultrasonic Sensor Works & Interface It With Arduino**. [S. l., 2020]. Disponível em: <https://lastminuteengineers.com/arduino-sr04-ultrasonic-sensor-tutorial/>. Acesso em: 19 fev. 2020.

LAWSON, C. R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. **Geosynthetics International**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 384-427, 2008. DOI: 10.1680/gein.2008.15.6.384.

LESHCHINSKY, D. *et al.* Geosynthetic Tubes for Confining Pressurized Slurry: Some Design Aspects. **Journal of Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 122, n. 8, p. 682-690, 1996. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:8(682).

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 4. ed. Campinas: Átomo, 2016.

LIU, G. S. Design criteria of sand sausages for beach defences. *In*: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH, 19., 1981, New Delhi. **Proceedings** [...]. New Delhi: [s. n.], 1981. p. 123-131.

LOPES, M. L.; CARNEIRO, J. R. **Durabilidade de geossintéticos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019.

MAURER, B. W. *et al.* Geotextile dewatering of flocculated, fiber reinforced fly-ash slurry. **Fuel**, [s. l.], v. 97, p. 411-417, 2012. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.02.013.

MOGAMI, S. Desaguamento de lodo de ETAs e ETEs. **Revista Hydro**, [s. l.], p. 18-26, 2010.

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

MORVAI, L. Escolher o sistema de desaguamento mecânico de lodo: uma missão possível. **Portal Tratamento de Água**, [s. l.], p. 41, 2018.

MÜLLER, M.; VIDAL, D. M.; GUANAES, E. A. Adensamento de resíduo confinado no processo de desague em Sistema de Confinamento de Resíduos (SCR): um estudo comparativo entre dados de campo e bibliografia. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, [s. l.]. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2018. p. 7.

OBBER. **Manual de execução**: ensaio de cone. Nova Odessa: Ober, 2019.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

PALMERTON, J. B. Distinct element modeling of geosynthetic fabric containers. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002, Nice. **Anais [...]**. Nice: [s. n.], 2002. p. 1021-1024.

PESSOA, J. H. Gestão dos efluentes da ETA em Nova Odessa - São Paulo. *In*: SIMPÓSIO: EXPERIÊNCIAS EM GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS POR BACIA HIDROGRÁFICA, 10., 2007, São Pedro. **Anais [...]**. São Pedro: [s. n.], 2007.

PLAUT, R. H.; SUHERMAN, S. Two-dimensional analysis of geosynthetic tubes. **Acta Mechanica**, [s. l.], v. 129, n. 3-4, p. 207–218, 1998. DOI: 10.1007/BF01176746.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

POSITAL FRABA. **Technology Linear Sensors**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.posital.com/en/products/linear-sensors/linarix-technology/linarix-technology.php>. Acesso em: 19 fev. 2021.

RICHTER, C. A. **Água**: métodos e tecnologia de tratamento. São Paulo: Blucher, 2009.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Blucher, 2001.

SALUS ENGENHARIA. **Desaguamento em caçambas especiais drenantes**. [S. l.], 2020. Disponível em: [https://salusengenharia.com/wp-content/uploads/2020/08/Revista\\_Salus\\_Online.pdf](https://salusengenharia.com/wp-content/uploads/2020/08/Revista_Salus_Online.pdf). Acesso em: 25 jan. 2021.

SATYAMURTHY, R.; BHATIA, S. K. Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles. **Geosynthetics International**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 83-96, 2009. DOI: 10.1680/gein.2009.16.2.83.

SEAY, P. A. **Finite element analysis of geotextile tubes**. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute, 1998.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO (SAAE). **Sistemas de tratamento de água**. [S. l.: s. n.], 2006.

SILVA, L. C. F. **Utilização de tubos geotêxteis para confinamento, desaguamento e empilhamento de rejeito de ouro**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SILVA, V. L. **Análise do comportamento de tubos geotêxteis para confinamento de rejeito fino de mineração por meio de modelagem numérica**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

SILVA, V. L.; GARDONI ALMEIDA, M. G.; PIMENTEL, K. C. A. Numerical modelling of geotextile tubes filled with gold mine tailings. **Geosynthetics International**, [s. l.], p. 1-32, 2021.

SILVESTER, R. Use of grout-filled sausages in coastal structures. **Journal of Waterway port Costal and Ocean Engineering**, [s. l.], v. 112, n. 1, p. 95-114, 1986.

SMOLLEN, M.; KAFAAR, A. Electroosmotically enhanced sludge dewatering: Pilot-Plant Study. **Water Science Technology**, [s. l.], v. 30, n. 8, p. 159-168, 1994.

SOARES, A. F. S. *et al.* Métodos e Custos de Disposição de Lodo de ETA. *In*: SEMINÁRIO ESTADUAL SOBRE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 8.; SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DO ESPÍRITO SANTO, 4., 2009, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: [s. n.], 2009.

SOUZA, S. T.; PALMA, S. L. **Manual técnico: Geoforma FortBag**. Nova Odessa: Ober Geossintéticos, 2018.

SPV HIDROTÉCNICA BRASILEIRA LTDA. **Bombas submersíveis EG-1000**: catálogo técnico. [S. l.]: SPV Hidrotécnica Brasileira, 2000.

TENCATE. **Geotube Cone Test**: A fast and easy way to measure dewatering efficiency. [Georgia]: Tencate, 2012.

TENCATE. **TenCate Geotube GDT Test**: A demonstration of the methodology of geotube dewatering technology. [Georgia]: Tencate, 2011.

TSUTUYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água do Estado de São Paulo. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2001, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: [s. n.], 2001.

URASHIMA, B. M. C. *et al.* Sistemas fechados de geotêxtil empregados no desaguamento de resíduos de estação de tratamento de água: estudo de caso. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, [s. l.]. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2018a.

URASHIMA, D. C. *et al.* Sistemas fechado de geotêxteis empregados em desaguamento de resíduos: análise da durabilidade. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, [s. l.]. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2018b.

URASHIMA, D. C.; VIDAL, D. Sistemas de filtração com produtos sintéticos: mecanismos, características e dimensionamento. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL (RECEO), 4., 1999, [s. l.]. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 1999. p. 203-210. Disponível em: <https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/regeo99/1999-urashima-vidal.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2021.

VERTEMATTI, J. C. Aplicações em acondicionamento e dessecação de lodos e lamas. *In*: VERTEMATTI, J. C. (org.). **Manual brasileiro de geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. p. 505-527.

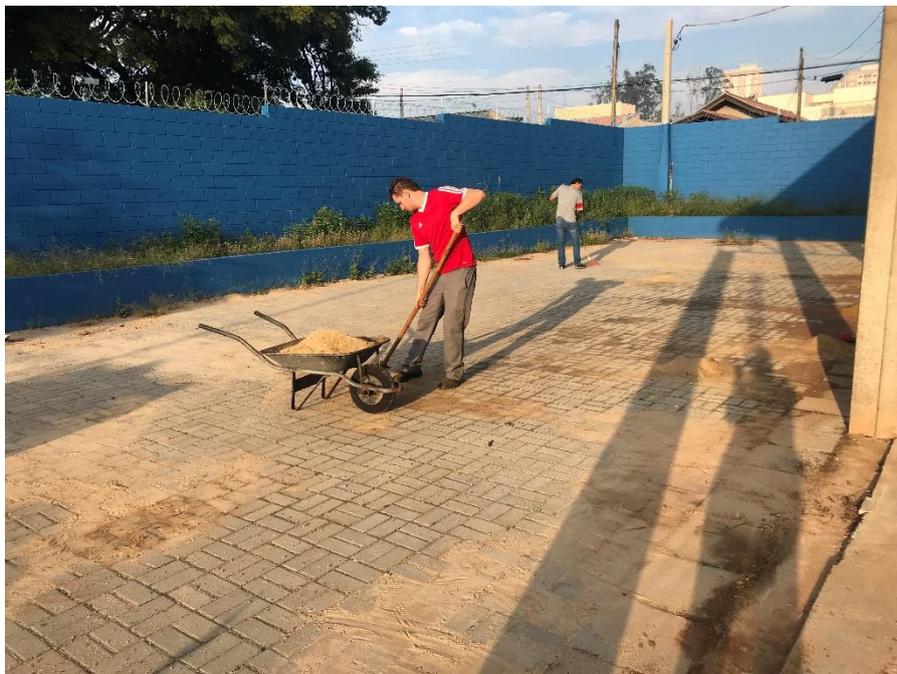
VERTEMATTI, J. C. **Curso básico de geotêxteis**: CBG. [S. l.]: ABINT, 2001. v. 1.

VERTEMATTI, J. C.; CASTRO, G. R. Contenções em obras hidráulicas. *In*: VERTEMATTI, J. C. (org.). **Manual brasileiro de geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. p. 275-303.

VILELLA, A. L. A. **Diagnóstico dos resíduos gerados em estações de tratamento de água nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá-SP**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

## APÊNDICE A – Procedimento de instalação da infraestrutura dos tubos geotêxteis

1. A área foi limpa, removendo todas as partículas pontiagudas e de tamanho relativamente grande que pudessem causar avarias ao tubo geotêxtil.



2. Foi estendida uma camada de geotêxtil não tecido com massa por unidade de área de  $900 \text{ g/m}^2$  para proteção das camadas subsequentes.



3. Para o primeiro tubo geotêxtil, foi instalada uma geomembrana de PVC e para o segundo tubo, uma lona automotiva confeccionada com tecido de polietileno de alta densidade recoberto com duas camadas de polietileno de baixa densidade.



4. Acima da geomembrana (ou da lona automotiva), foi aplicada uma camada de geocomposto drenante



5. O tubo geotêxtil foi então posicionado em cima de todas as camadas.



6. Foi aberta uma vala para instalação de uma tubulação de saída do percolado dotada de medidor de vazão. A geomembrana foi perfurada com um flange para abrir a saída.



7. A estrutura metálica, fabricada sob medida, para formar as bordas da piscina de captação do percolado foi montada.



8. A geomembrana foi presa a estrutura através de abraçadeiras de nylon que passavam por ilhoses inseridos na própria geomembrana.



9. Por fim, foi montado o pórtico para instalação dos instrumentos de monitoramento. Para protegê-los de chuvas e também da luz intensa do sol que atrapalhava as medições de alguns equipamentos, foi montada, para o primeiro experimento, uma cobertura com lona preta e para o segundo, uma cabana sob medida fabricada com lona amarela revestida de geotêxtil.





### APÊNDICE B – Imagens da intervenção na tubulação de sucção (segundo tubo geotêxtil)



Após o fechamento da tubulação de saída do poço, ocorreu a instalação da bomba



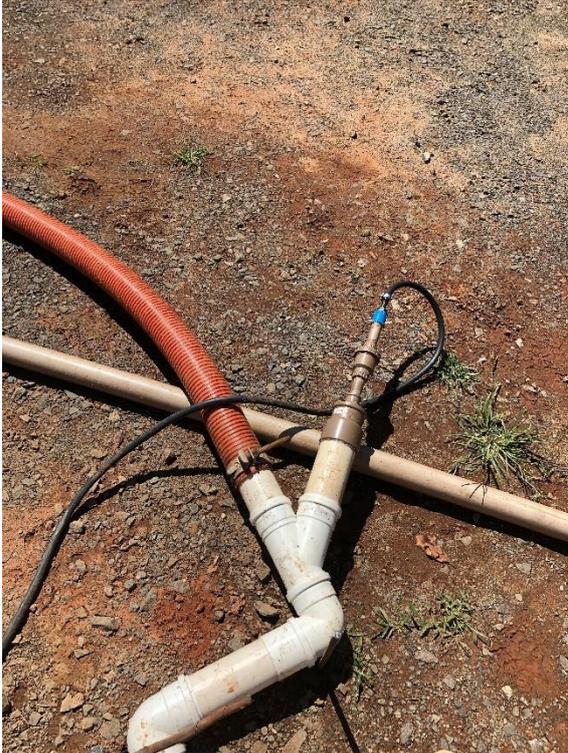
Tubulação de sucção saindo do poço



Na sequência, no sentido do poço para o tubo geotêxtil: a entrada de polímero, a chicana, o registro e o medidor de vazão



Chicana



Entrada do polímero



Tanque de preparação do polímero (após o preparo, era inserida bomba dosadora para injetar na tubulação)



Coleta de amostras: verificação da floculação