

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE TUBOS DE
GEOTÊXTEIS UTILIZADOS EM OBRAS DE PROTEÇÃO
AMBIENTAL**

MICHAEL ANDREY VARGAS BARRANTES

ORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc

CO-ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.TD-186/23

BRASÍLIA / DF, ABRIL DE 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE TUBOS DE
GEOTÊXTEIS UTILIZADOS EM OBRAS DE PROTEÇÃO
AMBIENTAL

MICHAEL ANDREY VARGA BARRANTES

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

PROF. LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSC. (UNB)
(ORIENTADOR)

PROF. ENNIO MARQUES PALMEIRA, PHD. (UNB)
(CO-ORIENTADOR)

PROF. GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO (UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)

PROFA. MARIA DAS GRAÇAS GARDONI ALMEIDA (UFMG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

PROF. FERNANDO HENRIQUE MARTINS PORTELINHA (UFSCar)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 27 de abril de 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

BARRANTES, MICHAEL ANDREY VARGAS

Avaliação do comportamento de tubos de geotêxteis utilizados em obras de proteção ambiental [Distrito Federal] 2022

107 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2022)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Tubos de geotêxteis

2. Obras de proteção ambiental

3. Geotêxtil não tecido

4. Processo de desaguamento

I. ENC/FT/UnB

II. Doutor

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARRANTES, M.A.V (2022). Avaliação do comportamento de tubos de geotêxteis utilizados em obras de proteção ambiental. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-183/23, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Michael Andrey Vargas Barrantes

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Avaliação do comportamento de tubos de geotêxteis utilizados em obras de proteção ambiental.

GRAU / ANO: Doutor / 2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Michael Andrey Vargas Barrantes

Asa Norte, EQN 412/413 Bloco A, Apto 35, Ed. Real Park

CEP: 70867-405 – ASA NORTE/DF – Brasil

ma12vargas@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado as forças em continuar e finalizar essa etapa na minha vida. Por me permitir que no decorrer pudesse conhecer a pessoa que sempre me motiva, me inspira, me apoia, me empolga e sempre está presente comigo o tempo todo. Quero agradecer a minha parceira de vida, minha amiga, meu grande amor por todos os momentos que compartilhamos desde que te conheci, por finalizar mais uma etapa agora do teu lado, sem dúvida nenhuma você foi essencial.

Agradeço aos meus orientadores, o professor Luís Fernando, por ter me aceitado neste desafio, pela confiança e pela amizade, e ao professor Ennio, pela sua dedicação, paciência, amizade, por ter acreditado em mim, por ter sempre disponibilidade para esclarecer minhas dúvidas e corrigir meus erros de forma tranquila.

Aos professores membros da banca examinadora, a Profa. Maria das Graças Gardoni Almeida, o Prof. Fernando Henrique Martins Portelinha e ao Prof. Gregório Luís Silva Araújo, pelas contribuições na defesa, com certeza fizeram que o encerramento da pesquisa fosse muito enriquecedor.

De forma geral agradeço a minha família, aos meus sogros e cunhados pelo apoio, e as demais pessoas que também contribuíram em diversas formas no decorrer da pesquisa.

Agradeço à CAPES, CNPq e o Radiko pelo apoio financeiro.

RESUMO

A construção de obras de proteção contra inundações, desvios de cursos d'água, quebra ondas por meio de métodos convencionais de construção tem levado ao aumento no uso de métodos alternativos, entre eles o emprego de tubos de geotêxteis. Este método possui rapidez na implementação bem como redução nos custos. Outros empregos de tubos de geotêxteis têm sido dirigidos ao desaguamento de materiais finos resultantes de processos industriais ou tratamento de águas residuais com diferentes concentrações. No entanto, poucos estudos têm sido realizados para entender o comportamento dessas estruturas quanto ao material de confecção do tubo e o material de preenchimento. Nesse sentido, a presente tese teve como objetivo o estudo do comportamento de tubos de geotêxtil utilizados em obras de proteção ambiental. Para tanto, foram definidos ensaios utilizando solos arenoso e argiloso como materiais de preenchimento e geotêxtil não tecido na confecção dos tubos. Foram desenvolvidos enchimentos de tubos em condições isoladas e empilhadas. Os ensaios foram instrumentados com a finalidade de obter as variações da altura dos tubos, as poropressões desenvolvidas no material de enchimento, assim como as tensões verticais na base dos tubos. Variações na deformação do geotêxtil foram obtidas durante o ensaio e amostras do material passante foram coletadas para o estudo da sua capacidade de retenção. Além disso, foram realizados ensaios de palheta nos tubos empilhados e em dois ensaios isolados para verificar a resistência não drenada do solo de enchimento. Resultados em tubos preenchidos com areia permitiram analisar o rápido processo de estabilização no desaguamento, bem como a estabilização das tensões e poropressões na base do tubo para servirem de referência na calibração do sistema. Após esse processo, os solos argilosos foram utilizados nos enchimentos com tubos isolados e empilhados. Os resultados mostraram que o processo de desaguamento inicial foi caracterizado por picos de poropressões e tensões totais na base dos tubos, que foram se estabilizando com o passar do tempo. As maiores deformações no geotêxtil foram obtidas no final do processo de enchimento com pequenas variações durante o ensaio. A variação da resistência não drenada com a profundidade no ensaio empilhado e em dois ensaios isolados mostrou diminuição da resistência com a profundidade devido a condição impermeável da fundação. Todos esses resultados mostraram a importância de verificar o comportamento do tubo de geotêxtil tanto na condição empilhada quanto na condição isolada, que podem modificar a geometria final dos tubos e influenciar no processo de desaguamento, resistência do material de enchimento e na deformação do geotêxtil.

PALAVRAS-CHAVE: Tubos de geotêxtil, obras de proteção ambiental, geotêxtil não tecido, processo de desaguamento.

ABSTRACT

The construction of structures to protect against floods, water diversions, breaking waves through conventional construction methods has led to an increase in the use of alternative methods, including the use of geotextile tubes. This method has quick implementation as well as reduced costs. Other uses with of geotextile tubes have been directed to the dewatering of fine-grained materials resulting from industrial processes or wastewater treatment with different concentrations. However, few studies have been carried out to understand the behavior of these structures in terms of the type of geotextile and filling material and technique. In this sense, the present work aimed to study the behavior of geotextile tubes used in environmental protection works. For this purpose, tests were defined using sandy and clayey soils as filling materials and non-woven geotextile in the manufacture of tubes. Thus, filling of single and stacked tubes conditions was carried out. The tests were instrumented to obtain variations in the height of the tubes, pore pressures in the filling material as well as the vertical stresses at the base of the tubes. Variations in the deformation of the geotextile were obtained during the test and samples of the soil particles passing through the geotextile were collected for the study of its retention capacity. In addition, vane tests were performed on the filling material to obtain its undrained strength. Results for tubes filled with sand allowed analyzing the rapid stabilization process of the dewatering process, as well as the stabilization of stresses and pore pressures at the base of the tube and served as a reference to calibrate the system. After this process, the clayey soils were used to fill single and stacked tubes. The results obtained showed that the initial dewatering process was characterized by pore pressure peaks and total stresses at the base of the tubes that stabilized over time. The greatest deformations in the geotextile were obtained at the end of the filling process with small variations during the test. The variation of undrained strength with depth in the stacked tubes and in two of the single tubes showed a decrease in strength with depth due to the impermeable condition of the foundation. All these results showed the importance of verifying the behaviour of the nonwoven geotextile both for isolated and stacked tubes, which can modify the geometry and influence the dewatering process, the strength of the filling material and the strains in the geotextile.

KEY WORDS: Geotextile tubes, environmental protection works, nonwoven geotextile, dewatering process.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.2	ESCOPO DO TRABALHO.....	2
2	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1	TUBOS DE GEOTÊXTEIS E GEOMEMBRANAS	4
2.2	TUBOS DE GEOTÊXTEIS-ASPECTOS DE PROJETO.....	8
2.3	ANÁLISE DE DESAGUAMENTO EM TUBOS DE GEOTÊXTEIS.....	13
2.3.1	PROCESSO DE DESAGUAMENTO DE TUBOS GEOTÊXTEIS.....	14
2.3.2	FASES DE ENCHIMENTO.....	14
2.3.3	FASES DE REBAIXAMENTO	16
2.3.4	FASE INICIAL DE ENCHIMENTO	17
2.3.5	FASE INICIAL DE REBAIXAMENTO	18
2.3.6	FASES SUBSEQUENTES DE ENCHIMENTO E REBAIXAMENTO.....	19
2.4	APLICAÇÕES DE TUBOS DE GEOTÊXTEIS.....	20
2.4.1	SOLUÇÕES PARA O DESSECAMENTO DE LODOS E ESGOTO	20
2.4.2	QUEBRA ONDAS E PREVENÇÃO DA EROSÃO COSTEIRA	21
2.4.3	USO DE GEOTÊXTEIS NA MINERAÇÃO.....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	EQUIPAMENTO DE ENSAIO PARA O ENCHIMENTO DE TUBOS DE GEOTÊXTEIS	28
3.1.1	RESERVATÓRIO PARA PRODUÇÃO DE MISTURA	29
3.1.2	SISTEMA DE BOMBEAMENTO.....	30
3.1.3	ÁREA DE ENCHIMENTO DOS TUBOS DE GEOTÊXTIL	31
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS	33
3.2.1	MATERIAIS DE PREENCHIMENTO.....	33
3.2.2	GEOTÊXTIL	34

3.3	INSTRUMENTAÇÃO	36
3.3.1	TRANSDUTOR DE PRESSÃO.....	36
3.3.2	CÉLULAS DE TENSÃO TOTAL	38
3.3.3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	39
3.3.4	EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS DE PALHETA (<i>VANE TEST</i>).....	40
3.4	SEQUÊNCIA GERAL DAS ATIVIDADES	42
3.5	INSTALAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO	43
3.6	DEFINIÇÃO DOS ENCHIMENTOS	44
3.7	CONCENTRAÇÃO DO MATERIAL DE PREENCHIMENTO	45
3.8	PREPARAÇÃO DOS TUBOS DE GEOTÊXTIL	46
3.9	EXECUÇÃO DOS ENCHIMENTOS	46
3.9.1	ENCHIMENTO DO TUBO DE GEOTÊXTIL COM SOLO ARENOSO	46
3.9.2	ENCHIMENTO DO TUBO DE GEOTÊXTIL ISOLADO COM SOLO ARGILOSO.....	48
3.9.3	ENCHIMENTO DE TUBOS DE GEOTÊXTIL EMPILHADOS COM SOLO ARGILOSO.....	49
3.9.4	ENCHIMENTO DE TUBO DE GEOTÊXTIL COM SOLO ARGILOSO COM E SEM SISTEMA DE DRENAGEM INTERNO	51
3.10	MEDIÇÃO DO VOLUME DE ÁGUA NO PROCESSO DE DESAGUAMENTO	53
4	ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	54
4.1	ENCHIMENTO DE TUBOS GEOTÊXTEIS COM SOLO ARENOSO.....	54
4.1.1	POROPRESSÕES E TENSÕES TOTAIS	54
4.1.2	DEFORMAÇÃO NO GEOTÊXTIL	58
4.2	ENSAIOS COM TUBOS PREENCHIDOS COM SOLO ARGILOSO	60
4.2.1	INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE ENCHIMENTO NO COMPORTAMENTO DOS TUBOS GEOTÊXTEIS	60
4.2.2	INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE DESAGUAMENTO NO COMPORTAMENTO DOS TUBOS GEOTÊXTEIS	71

4.2.3 COMPORTAMENTO DE TUBOS GEOTÊXTEIS EM CONFIGURAÇÃO EMPILHADA	87
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	98
5.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos utilizados.....	34
Tabela 3.2 - Especificações dos transdutores de pressão segundo o manual do fabricante	37
Tabela 3.3 - Especificações do equipamento para ensaios de palheta	41
Tabela 3.4 - Ensaios realizados	45
Tabela 4.1 - Resultados obtidos nos ensaios	54
Tabela 4.2 - Forças de tração de geotêxteis mobilizadas (final de enchimento e no final do ensaio) e previstas (final de enchimento).	71
Tabela 4.3 - Resumo das diferenças obtidas nas comparações das previsões com as medições dos ensaios TG-CD e TG-SD.....	83
Tabela 4.4 - Forças de tração de geotêxteis mobilizadas (final de enchimento e final do ensaio) e previstas (final de enchimento).....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Seção transversal do tubo geotêxtil (modificado de Lawson, 2008).....	4
Figura 2.2 - Geometria de tubos; a) configuração empilhada em condição de equilíbrio, b) diagrama de corpo livre em tubos de geomembrana de duas camadas (Plaut & Klusman, 1999; Guo & Chu, 2016).....	5
Figura 2.3 - Diagrama esquemático do tubo geotêxtil na praia de Young –Jin (Oh & Shin, 2006)	5
Figura 2.4 - Revestimento típico de geofôrmas preenchidas com areia (0,75 m ³).....	5
Figura 2.5 - Estabilização de tubos de geomembrana contra rolamento ou escorregamento; a) um defletor perfurado (diafragma) dentro do tubo, b) dois tubos de geomembrana colocados dentro de um tubo maior, c) configuração empilhada (Modificado de Kim <i>et al.</i> , 2005a e 2005b).....	6
Figura 2.6 - Tubo de geomembrana com defletor interno (Ghavanloo & Maneshi (2018).	7
Figura 2.7 - Seção transversal de dique de borracha de dupla camada e dique de borracha tradicional (modificado de Gao <i>et al.</i> , 2022).....	7
Figura 2.8 - Seção transversal do tubo (modificado de Leshchinsky <i>et al.</i> ,(1996).....	9
Figura 2.9 - Seção transversal do tubo sobre fundação rígida. a) Geometria da seção; b) Elemento infinitesimal do geotêxtil (Plaut & Suherman, 1998)	11
Figura 2.10 - Diagrama de corpo livre de tubos de geotêxtil em fundação rígida; (a) corpo livre de meia seção transversal, (b) corpo livre da curva OS (Guo <i>et al.</i> ,2014).....	12
Figura 2.11 - Fases do processo de desaguamento do tubo geotêxtil (modificado de Ratnayesuraj & Bhatia, 2018)	14
Figura 2.12 - Representação das fases subsequentes (modificado de Yee & Lawson 2012)...	16
Figura 2.13 - Parâmetros usados no modelo analítico do processo de desaguamento (modificado de Yee & Lawson, 2012).....	18
Figura 2.14 - Tubos de geotêxteis para o dessecamento de lodos na Cidade de Rio das Ostras, RJ, Brasil (Castro <i>et al.</i> , 2008)	21
Figura 2.15 - Utilização de tubos de geotêxtil na proteção de linha costeira (modificado de Lee & Douglas, 2012).	23
Figura 2.16 - Hierarquia da gestão de resíduos para redução de volume (Modificado de Yilmaz, 2011).....	24
Figura 2.17 - Dessecamento de rejeitos (Newman <i>et al.</i> , 2004)	25
Figura 2.18. Empilhamento de rejeitos (Wilke <i>et al.</i> ,2015)	26

Figura 2.19 - Barragem de rejeitos construída com tubos geotêxteis (modificado de Yang <i>et al.</i> , 2019).....	26
Figura 3.1 - Vista geral do canal hidráulico- (a) Desenho esquemático geral. (b) Vista da disposição do reservatório e bomba draga; (c) Parte do topo e lateral do sistema.....	29
Figura 3.2 - Vista geral do canal hidráulico: (a) vista do reservatório dentro do canal; (b) vista lateral do reservatório.....	30
Figura 3.3 - Reservatório e área de mistura; (a) chapa de aço suspensa dentro do reservatório, (b) separação da água e solo saturado antes do processo de mistura.	30
Figura 3.4 - Sistema de bombeamento	31
Figura 3.5 - Vista da área de enchimento dos tubos de geotêxtil; (a) enchimento do tubo de geotêxtil, (b) registro de controle	31
Figura 3.6 - Área de enchimento dos tubos de geotêxtil; (a) vista interna, (b) vista lateral, (c) medição da altura do tubo	32
Figura 3.7 - Sistema de medição de coluna de água na base do tubo.	33
Figura 3.8 - Vista geral da área de enchimento dos tubos de geotêxtil.....	33
Figura 3.9 - Distribuição granulométrica do solo 1 e 2.....	34
Figura 3.10 - Geotêxteis utilizados na pesquisa: (a) GNT-01; (b) GNT-02.....	35
Figura 3.11 - Tubo corrugado perfurado: (a) Vista do diâmetro; (b) Vista do comprimento..	35
Figura 3.12 – Sistema de drenagem: (a) tubo corrugado envelopado com geotêxtil; (b) posição do sistema de drenagem dentro do tubo de geotêxtil.	35
Figura 3.13 - Transdutores de pressão- Modelo SPT-102 (Fonte: Manual de instalação e operação – Semsym (2017).....	36
Figura 3.14 - Sistema de pedra porosa; a) sistema ligado ao transdutor de pressão, b) processo de saturação do geotêxtil	37
Figura 3.15 - Equipamento utilizado na calibração dos transdutores de pressão.....	38
Figura 3.16 - Célula de tensão total utilizada na pesquisa.	38
Figura 3.17 - Processo de vedação das células de tensão total – (a) proteção das conexões e <i>strain gauge</i> ; (b) vedação interna e externa.	39
Figura 3.18 - Equipamento de calibração das CTT.....	39
Figura 3.19 - Sistema LYNX, modelo ADS 2000	40
Figura 3.20 - Equipamento do ensaio de palheta	40
Figura 3.21 - Procedimento de ensaio	42
Figura 3.22 - Localização das células de tensão total	43
Figura 3.23 - Localização dos transdutores de pressão	43

Figura 3.24 - Tipos de ensaios desenvolvidos na pesquisa	45
Figura 3.25 - Confeção dos tubos de geotêxtil. a) Com máquina portátil; b) com máquina de bancada.....	46
Figura 3.26 - Instrumentação utilizada no ensaio com solo arenoso.....	47
Figura 3.27 - Instrumentação para o ensaio com solo argiloso: (a) Células de tensão total, transdutores de pressão e coluna de água; (b) Após a primeira fase de enchimento; (c) Medição da altura	48
Figura 3.28 - Processo de enchimento dos tubos em configuração empilhada.....	49
Figura 3.29 - Instrumentação na configuração empilhada: (a) tubos localizados na base; (b) tubo localizado no topo.	50
Figura 3.30 - Verificação da umidade no final do ensaio: (a) amostras superficiais; (b) amostras na linha de centro com diferentes profundidades.....	51
Figura 3.31 - Montagem do tubo corrugado perfurado no interior do tubo de geotêxtil – (a) localização das células de tensão e transdutores de pressão; (b) montagem do tubo corrugado perfurado.	52
Figura 3.32 - Ensaio complementar com equipamento <i>vane test</i>	52
Figura 3.33 - Captação de água durante o ensaio.....	53
Figura 4.1 - Poropressão medida no ensaio TGA-02	55
Figura 4.2 - Poropressão medida no ensaio TGA-03	55
Figura 4.3 – Comparação das poropressões empregando o transdutor de pressão e medição pela coluna de água no ensaio TGA-02	56
Figura 4.4 - Comparação das poropressões empregando o transdutor de pressão e medição pela coluna de água no ensaio TGA-03	57
Figura 4.5 - Tensão total medida no ensaio TGA-02.....	57
Figura 4.6 - Tensão total medida no ensaio TGA-03	58
Figura 4.7 - Deformações no geotêxtil nos ensaios TGA-02 e TGA-03 após enchimento.....	59
Figura 4.8 - Deformação nos ensaios TGA-02 e TGA-03 no final do ensaio.....	59
Figura 4.9 - Volume acumulado de água drenada durante os ensaios.	60
Figura 4.10 - Variação da altura do tubo com o tempo.....	61
Figura 4.11 - Variação do volume do tubo e concentração de sólidos com o tempo (a) Variação do volume versus tempo; (b) Volume e concentração de sólidos versus tempo - TG-SD.....	62
Figura 4.12 - Variação da vazão de desaguamento com o tempo.	63
Figura 4.13 - Variação da poropressão com o tempo; a) TG-SD; b) TG-3FE.....	64
Figura 4.14 - Tensão total normalizada na base do tubo versus tempo – ensaio TG-SD.....	65

Figura 4.15 - Tensão total normalizada na base do tubo versus tempo - TG-3FE.....	65
Figura 4.16 - Variação da deformação de tração ao longo do perímetro do tubo nos ensaios TG-SD e TG-3FE.....	66
Figura 4.17 - Distribuição de partículas de solo que passaram pelo geotêxtil.	67
Figura 4.18 - Comparação entre volumes previsto e medido do tubo geotêxtil (a) Variação do volume no ensaio TG-SD; (b) Variação do volume no ensaio TG-3FE	68
Figura 4.19 - Seção transversal do tubo prevista e medida no ensaio TG-SD no final do enchimento	69
Figura 4.20 - Comparações entre as dimensões do tubo previstas e medidas - Ensaio TG-SD	69
Figura 4.21 - Comparações entre as dimensões do tubo previstas e medidas, e tensões verticais na base do tubo após o enchimento - Ensaio TG-SD	70
Figura 4.22 - Volume acumulado de água drenada nos ensaios TG-CD e TG-SD.....	72
Figura 4.23 - Variação da altura TG-CD.....	73
Figura 4.24 - Variação da altura TG-SD	73
Figura 4.25 - Variação de volume vs Concentração no ensaio TG-CD.....	74
Figura 4.26 - Variação de volume vs Concentração no ensaio TG-SD	74
Figura 4.27 - Variação da vazão de desaguamento	75
Figura 4.28 - Poropressões medidas no ensaio TG-CD	76
Figura 4.29 - Poropressões medidas no ensaio TG-SD	76
Figura 4.30 - Tensão total normalizada vs tempo no ensaio TG-CD.....	77
Figura 4.31 - Tensão total normalizada vs tempo no ensaio TG-SD	77
Figura 4.32 - Deformações no geotêxtil nos ensaios TG-CD e TG-SD após enchimento.....	78
Figura 4.33 - Deformação nos ensaios TG-CD e TG-SD final do ensaio.....	79
Figura 4.34 - Volume previsto vs volume medido ensaio TG-CD	79
Figura 4.35 - Volume previsto vs volume medido ensaio TG-SD.....	80
Figura 4.36 - Comparações entre as dimensões do tubo previstas e medidas - TG-CD	81
Figura 4.37 - Comparações entre as dimensões do tubo e tensões verticais na base do tubo previstas e medidas após o enchimento – ensaio TG-CD	82
Figura 4.38 - Perfil de resistência do TG-SD.....	84
Figura 4.39 - Perfil de resistência do TG-CD	85
Figura 4.40 - Perfil de umidade no ensaio TG-CD e TG-SD.....	85
Figura 4.41 - Distribuição das partículas de solo que passaram pelo geotêxtil.....	86
Figura 4.42 - Volume acumulado de água drenada no ensaio empilhado.....	88

Figura 4.43 - Variação da altura do TGE-01	88
Figura 4.44 - Variação da altura do TGE-02.....	89
Figura 4.45 - Variação da taxa de desaguamento.....	89
Figura 4.46 - Poropressões medidas no ensaio com empilhamento (TGE-01).....	90
Figura 4.47 - Poropressões medidas no ensaio com empilhamento (TGE-02).....	91
Figura 4.48 - Poropressões medidas no ensaio com empilhamento (TGE-03).....	91
Figura 4.49 - Tensão total na base do tubo no ensaio TGE-01	92
Figura 4.50 - Tensão total na base do tubo no ensaio TGE-02	93
Figura 4.51 - Deformação do TGE-01, TGE-02 e TGE-03 após o enchimento	93
Figura 4.52 - Deformação do TGE-01 e TGE-02 após o enchimento de TGE-03.....	94
Figura 4.53 - Deformações em TGE-01, TGE-02 e TGE-03 no final do ensaio	95
Figura 4.54 - Perfil de resistência do TGE-01, TGE-02 e TGE-03.....	96
Figura 4.55 - Distribuição das partículas de solo que passaram pelo geotêxtil.....	97

LISTA DE SIMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACOES

A	- Seção transversal
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	- American Society for Testing and Materials
A_p	- Fator de qualidade do aglomerado e/ou flóculo
B	- Largura da base do tubo de geottil
b	- Contato da base do tubo de geottil com a fundação
C_c	- Coeficiente de curvatura
CTT	- Célula de tensão total
C_u	- Coeficiente de uniformidade
DERDF	- Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal
D_T	- Diâmetro teórico do tubo geottil
D_{50}	- Tamanho médio dos grãos
ε_{max}	- Deformação máxima
$E(k)$	- Integral elíptica completa de segundo tipo
G	- Gravidade específica da lama
GNT	- Geottil não tecido
H	- Altura total do tubo
H_{cr}	- Coluna de água crítica
h_T	- Altura do tubo de geottil preenchida ou atingida
Δh_T	- Mudana na altura do tubo geottil ao longo do intervalo de tempo Δ_t
J_2	- Rigidez  tração secante a 2% de deformação
J_5	- Rigidez  tração secante a 5% de deformação
k	- Parâmetro k na solução da integral elíptica completa
$K(k)$	- Integral elíptica completa do primeiro tipo
L, S	- Circunferência do tubo
m	- Número de enchimentos realizados
MA	- Massa por unidade de área
n	- Porosidade
n_{in}	- Porosidade da lama que entra no tubo
$n_{fe(1)}$	- Porosidade da pasta no final da fase de enchimento inicial
n_x	- Porosidade média da lama dentro do tubo durante o mesmo intervalo de tempo Δ_t
O_{95}	- Abertura de filtração

P	- Pressão interna
p_o	- Pressão de injeção
p_{bot}	- Pressão na base
P1P	- Ponto 1 poropressão
P2P	- Ponto 2 poropressão
P3P	- Ponto 3 poropressão
P1TV	- Ponto 1 Tensão Vertical
P2TV	- Ponto 2 Tensão Vertical
P3TV	- Ponto 3 Tensão Vertical
Q_{in}	- Taxa de bombeamento de enchimento
$Q_{out,f}$	- Taxa de desaguamento durante o enchimento do tubo
$Q_{out,f(1)}$	- Taxa de desaguamento durante a fase inicial de enchimento
S	- Concentração de sólidos em peso da lama
S_t	- Concentração de sólidos no tempo t
S_u	- Resistência não drenada
T	- Força de tração tangencial
t	- Tempo na fase de enchimento
T_{axial}	- Força de tração axial
TGA	- Tubo de geotêxtil com solo arenoso
TG-CD	- Tubo de geotêxtil com sistema de drenagem
TGE	- Tubo de geotêxtil empilhado
TG-SD	- Tubo de geotêxtil sem sistema de drenagem
TG-3FE	- Tubo de geotêxtil com três fases de enchimento
t_{GT}	- Espessura nominal
$t_{f(1)}$	- Tempo da primeira fase de enchimento
T_{max}	- Resistência à tração
γ	- Peso específico
V_T	- Volume final retido no tubo de geotêxtil
w	- Teor de água da lama

1 INTRODUÇÃO

Com a evidente mudança climática sofrida nas últimas décadas, tem-se a necessidade de desenvolver diferentes procedimentos para minimizar os processos erosivos nas margens dos rios ou ao longo da linha da costa, decorrentes do acréscimo do nível d'água e do impacto das ondas. Entre os diversos processos erosivos desenvolvidos na natureza, torna-se necessário compreender, avaliar e estudar estas ocorrências por meio de modelos que permitam representar satisfatoriamente o que acontece na realidade.

Diversos modelos em escala reduzida têm permitido compreender aspectos tais como o dimensionamento da estrutura, comportamento interno do material, estabilidade do conjunto, entre outros. Assim, as inovações tecnológicas dos materiais usados na engenharia geotécnica têm permitido o desenvolvimento de projetos mais funcionais, rápidos e ambientalmente amigáveis. No caso da Geotecnia, os materiais geossintéticos vêm sendo usados em obras da engenharia para cumprir funções de reforço, filtração, drenagem, separação, proteção, entre outras (Ortiz *et al.*, 2003).

A técnica que vem sendo utilizada com o passar dos anos e que ainda se encontra em estudo são os tubos geotêxteis, os quais, além de serem empregados principalmente no controle das águas e inundações, também são utilizados para prevenir erosão nas praias e proteção dos litorais (Oh & Shin, 2006). No entanto, ainda é necessário compreender melhor o comportamento do material de enchimento e do geotêxtil (tecido ou não tecido) em termos de deformação quando eles também são empregados em situações tais como para desaguar lamas, barreiras de proteção para o controle de enchentes ou como estruturas de contenção.

A mineração é também outra área de aplicação desta técnica, onde recentemente o interesse de introduzir esta técnica tem aumentado. Keibel *et al.*, (2016) apresentam conceitos inovadores para a construção de aterros de barragens de rejeitos com tubos de geotêxtil e considerações de estabilidade do sistema. Assim, realizando uma seleção cuidadosa de flocculação, o tubo geotêxtil pode ser empregado para o desague de qualquer tipo de material, sendo que os volumes podem ser reduzidos e armazenados de forma segura. Segundo os autores, o desaguamento e o adensamento de rejeitos, além do aumento da capacidade de armazenamento da lagoa de rejeitos, são as principais motivações na aplicação de tubos geotêxteis em barragens de rejeitos.

No caso do Brasil, nas rupturas de barragens como a mais recentemente acontecida na Barragem I da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, no estado de Minas Gerais (Koppe, 2020), tem sido adotada uma série de ações para a contenção e remoção do material decorrente

da ruptura. Parte dessas ações consideram o processo de desidratação ou desaguamento do rejeito com o auxílio de tubos geotêxteis (Vale, 2019).

Neste contexto, esta pesquisa tem como finalidade estudar o comportamento de tubos de geotêxtil, por meio de um programa de ensaios baseado no enchimento de tubos com solo arenoso e solo argiloso. Desta forma, foram realizados enchimentos na condição isolada e na condição empilhada, a partir de simulações laboratoriais em um canal hidráulico e a instrumentação geotécnica forneceu informações relevantes para o entendimento do comportamento dos tubos de geotêxtil.

1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral estudar o comportamento de tubos geotêxteis nas condições isolado e empilhados para o desaguamento de materiais saturados.

Os objetivos específicos desta pesquisa são os seguintes

- Estudar a deformação do tubo geotêxtil isolado;
- Avaliar o comportamento de tubos de geotêxteis empilhados para o estudo das tensões internas e deformações;
- Estudar o comportamento do geotêxtil como filtro sobre tensões de tração durante e após o preenchimento dos tubos de geotêxteis;
- Estudar as propriedades de resistência do material de enchimento argiloso após o processo de desaguamento;
- Comparar os resultados de laboratório com metodologias disponíveis na literatura quanto aos valores das tensões desenvolvidas no material geossintético e a sua geometria.

1.2 ESCOPO DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em cinco capítulos, conforme breve descrição a seguir:

O capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho levando em consideração a evolução da aplicação de tubo de geotêxteis em diferentes obras, assim como o objetivo geral e específicos desta pesquisa.

O capítulo 2 traz uma revisão de literatura, inicialmente com diferentes tipos de tubos de geotêxteis assim como alguns aspectos de projeto. Posteriormente é realizada uma revisão

do processo de desaguamento e finalmente diferentes aplicações em obras de proteção ambiental.

No capítulo 3 são apresentadas características geotécnicas do material estudado, a metodologia de preparação dos materiais utilizados nos ensaios assim como do equipamento desenvolvido para o processo de enchimento. No final do capítulo é apresentado os tipos de enchimentos realizados assim como dos ensaios complementares no material retido nos tubos geotêxtil.

O capítulo 4 apresenta os resultados do processo de enchimento dos tubos de geotêxtil por meio do monitoramento diário registrando as mudanças na geometria do tubo, deformações do geotêxtil não tecido, a quantidade de água drenada, assim como de ensaios complementares do material retido dentro dos tubos. Ainda neste capítulo é realizada uma discussão sobre os resultados obtidos dos ensaios com metodologias disponíveis na literatura.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais desta pesquisa, bem como sugestões para estudos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 TUBOS DE GEOTÊXTEIS E GEOMEMBRANAS

Os tubos de geotêxteis e geomembranas podem ser utilizados com vários propósitos, tais como: proteção contra inundações, desvio de água, dessecamento de lodos de estação e tratamento de água e de esgoto, quebra ondas, utilização de água para uso recreativo, entre outros. Em função do seu uso, podem ser obtidas diferentes geometrias. Dentre as diversas técnicas empregadas, também estão envolvidas diversas configurações segundo os seus usos onde podem ser utilizados de forma isolada ou empilhados.

Diversas pesquisas foram desenvolvidas para o estudo de tubos isolados, dentre elas destacam-se: Liu & Silvester (1977), Leshchinsky *et al.*, (1996), Plaut & Suherman (1998), Seay & Plaut (1998), Malík (2009), Guo *et al.*, (2011), Malik & Sysala (2011), Cantré & Saathoff (2011), Wang *et al.*, (2011), Yee & Lawson (2012), Guo *et al.*, (2011), Guo *et al.*, (2013), Guo *et al.*, (2014), Kim *et al.*, (2015), Kim *et al.*, (2016), Górnjak *et al.*, (2016), Pavanello *et al.*, (2019), Kim *et al.*, (2020), Kim & Dinoy (2021). Estas pesquisas consideram o estudo da estabilidade de um tubo isolado sobre fundações rígidas ou flexíveis e utilizando diferentes tipos de material de preenchimento. Considerando estes estudos, a Figura 2.1 mostra a principal geometria adotada neste tipo da análise.

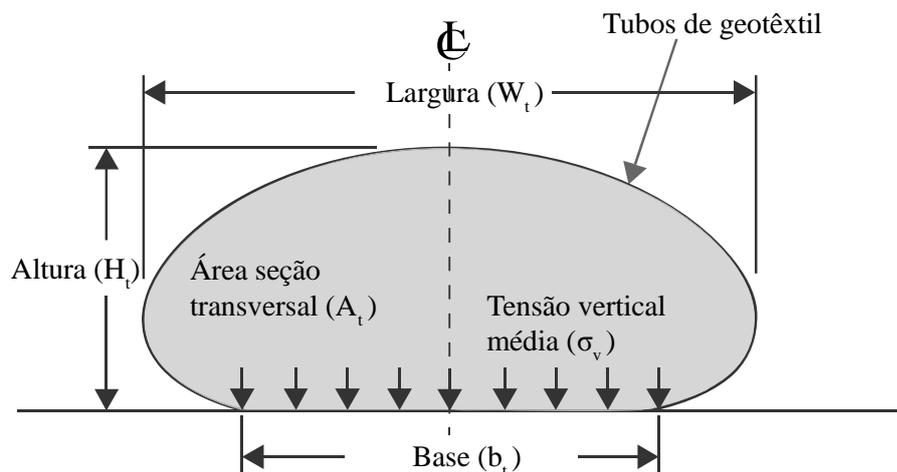


Figura 2.1 - Seção transversal do tubo geotêxtil (modificado de Lawson, 2008)

Alguns trabalhos tratam o estudo de mais de um tubo sob diferentes configurações. Plaut & Klusman (1999), Cantré (2002), Tyagi & Mandal (2006), Plaut & Filz (2008), Zhu *et al.*, (2014), Guo & Chu (2016), Pavanello *et al.*, (2019), Koh *et al.*, (2020) são alguns exemplos de estudos que tratam algumas configurações, como apresentado na Figura 2.2.

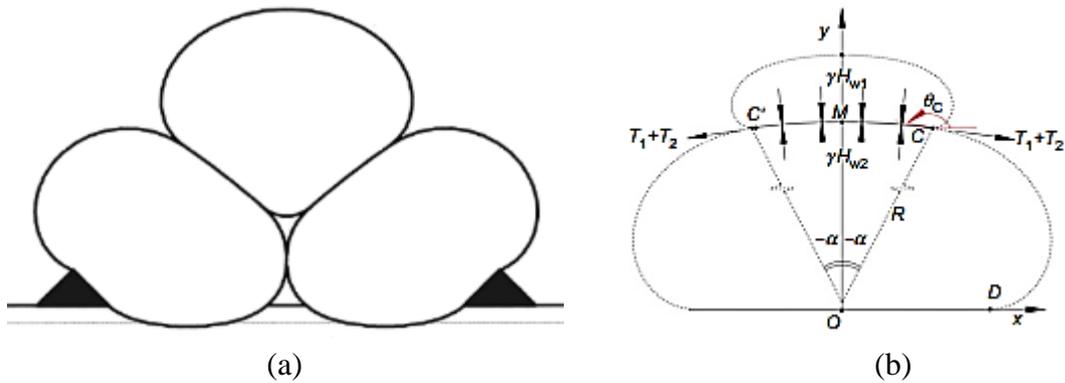


Figura 2.2 - Geometria de tubos; a) configuração empilhada em condição de equilíbrio, b) diagrama de corpo livre em tubos de geomembrana de duas camadas (Plaut & Klusman, 1999; Guo & Chu, 2016).

Oh & Shin (2006) e Shin & Oh (2007) apresentam um caso de estudo para a praia de Young-Jin, na costa leste da Coreia, para uma configuração de uma linha dupla de tubos utilizados na proteção do litoral, como apresentado na Figura 2.3.

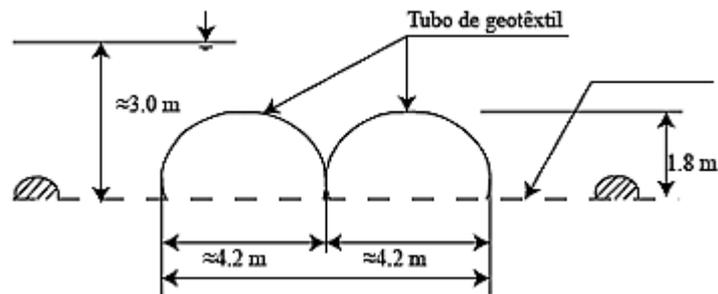


Figura 2.3 - Diagrama esquemático do tubo geotêxtil na praia de Young -Jin (Oh & Shin, 2006)

Algumas experiências têm sido feitas objetivando o estudo dos processos que prejudicam a estabilidade e a utilização de geofôrmas para o controle das erosões. Este tipo de abordagem é apresentado por Kim *et al.*, (2005b), Saathoff *et al.*, (2007) e Recio & Oumeraci (2007, 2009), Thompson *et al.*, (2020), Khajenoori *et al.*, (2021), Elias *et al.*, (2021), Elias *et al.*, (2022). Um exemplo de utilização de geofôrmas é apresentado na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Revestimento típico de geofôrmas preenchidas com areia (0,75 m³) (Saatooff *et al.*, 2007).

Kim *et al.*, (2005a, 2005b) realizaram uma série de estudos onde consideraram diversas configurações (Figura 2.5). Dessa forma, soluções como a divisão de um tubo isolado (Figura 2.5a), dois tubos de geomembrana inseridos em um tubo maior (Figura 2.5b) e uma configuração empilhada (Figura 2.5c), foram estudados para avaliar o comportamento e a estabilidade contra rolamento ou escorregamento quando submetidos à ação de água.

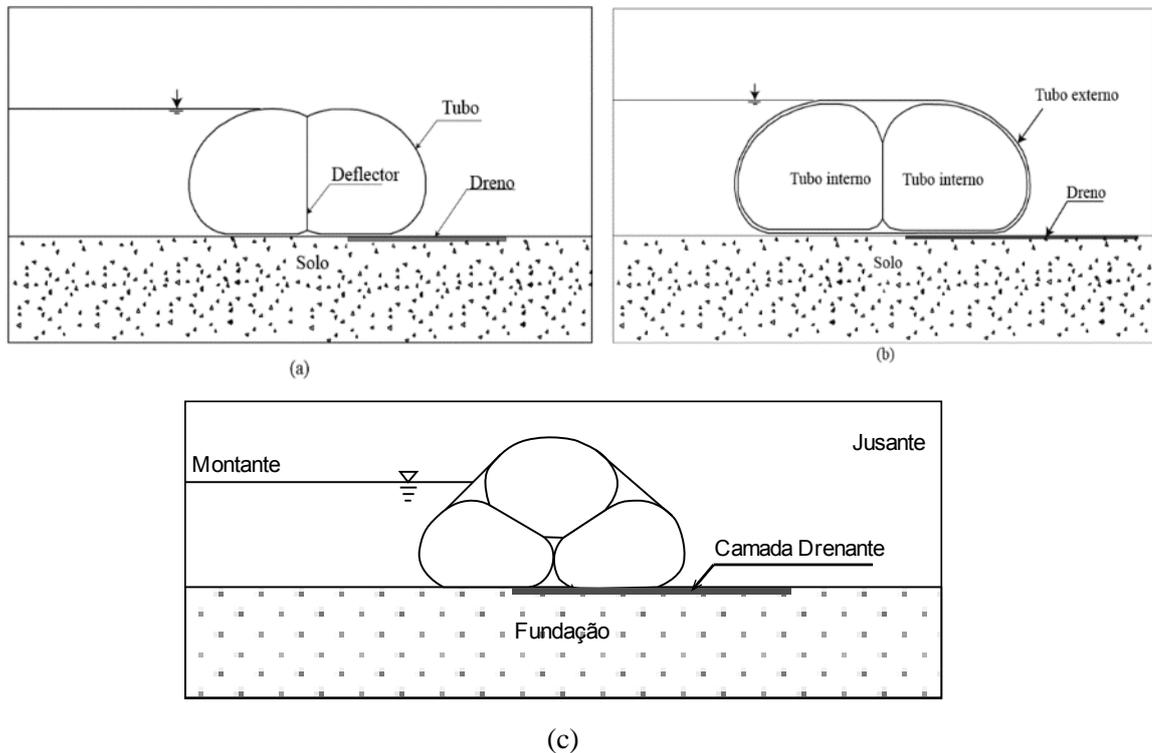


Figura 2.5 - Estabilização de tubos de geomembrana contra rolamento ou escorregamento; a) um defletor perfurado (diafragma) dentro do tubo, b) dois tubos de geomembrana colocados dentro de um tubo maior, c) configuração empilhada (Modificado de Kim *et al.*, 2005a e 2005b).

Outros casos em que problemas de contorno livre em condições de deformações planas para descrever os perfis de equilíbrio foram desenvolvidos por Ghavanloo & Maneshi (2018). O trabalho considera uma modificação da configuração interna do defletor (divisão interna no tubo de geomembrana) proposto por Kim *et al.*, (2005a) conforme apresentado na Figura 2.6. Soluções exatas foram desenvolvidas considerando o defletor interno, e o peso do tubo da geomembrana. Os resultados revelaram que a altura máxima do tubo pode ser controlada pelo defletor interno sendo dessa forma considerado como um mecanismo de controle no ajuste de altura.

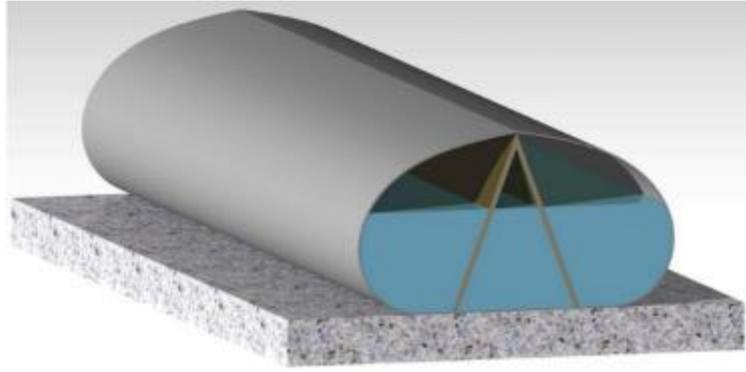


Figura 2.6 - Tubo de geomembrana com defletor interno (Ghavanloo & Maneshi (2018)).

Uma nova forma de dique de borracha de dupla camada ancorados em uma base rígida foi proposta por Gao *et al.*, (2022) com o objetivo de melhorar a capacidade de retenção de água de diques de borracha convencional (Figura 2.7). De acordo com os autores, considerando uma condição crítica de coluna de água igual a 1 ($H_{cr} = 1$) os perímetros da seção transversal do dique de borracha de dupla camada são pelo menos 25,7% maiores que os do dique de borracha convencional. Porém, as forças de tração conferem um valor de 69,6% menor que a solução convencional.

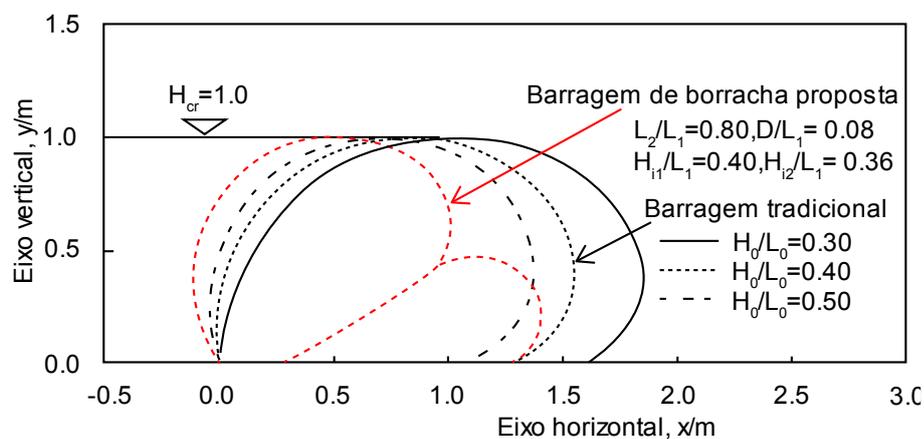


Figura 2.7 - Seção transversal de dique de borracha de dupla camada e dique de borracha tradicional (modificado de Gao *et al.*, 2022).

Dessa forma, são diversas as situações em que os tubos de geotêxtil ou geomembrana podem ser aplicados, apresentando particularidades que diferem de cada cenário. No entanto, a escolha da solução que mais se adequa pode ser facilitada com o entendimento do comportamento do tubo.

2.2 ASPECTOS DE PROJETO ENVOLVENDO TUBOS DE GEOTÊXTEIS

Para o desenvolvimento de projetos que envolvem o uso de tubos de geotêxteis é necessário o conhecimento de alguns aspectos que possam fornecer informações iniciais úteis a serem consideradas nos projetos e nas análises. Entre elas, encontram-se os cálculos de forças de tração e a seção transversal dos tubos geossintéticos. Na literatura encontra-se várias soluções analíticas que levam em conta diferentes considerações dependendo da situação, entre elas, fundação rígida, fundação deformável, tubos de geotêxteis submersos, tubos permeáveis ou impermeáveis etc.

Dentre as primeiras abordagens encontradas na literatura sobre tubos de geotêxteis têm-se as realizadas por Liu & Silvester (1977), na qual foi desenvolvida uma metodologia teórica para a análise da estabilidade do sistema e uma verificação experimental da metodologia. Esta solução buscou implementar uma alternativa mais econômica no controle da erosão no litoral.

Silvester (1986) comparou o custo econômico no uso de técnicas e materiais alternativos. Dentre as técnicas empregadas na construção de quebra ondas tradicionais da época, a técnica de tubos de geotêxtil é a mais econômica, chegando a apresentar uma grande diferença de custos.

Segundo Pilarczyk (1996), uma estrutura costeira é planejada como uma medida prática para resolver um problema específico. Começando com a identificação do problema, vários estágios podem ser distinguidos no projeto da estrutura de contenção ou estabilização usando tubos geotêxteis. Após a escolha da solução funcional, o projeto estrutural começa incluindo a criação de alternativas estruturais (usando diferentes materiais e vários métodos de execução). Finalmente, a escolha será feita após a verificação de várias soluções estruturais em relação aos critérios funcionais, ambientais e econômicos.

Várias soluções numéricas têm sido desenvolvidas com o intuito de determinar as forças e as deformações no geotêxtil para uma geometria final do tubo. O método proposto por Leshchinsky *et al.*, (1996) apresenta uma análise bidimensional (deformação plana) no cálculo das tensões geradas no material de geotêxtil assim como a previsão da sua geometria. O peso do geotêxtil e o atrito entre o geotêxtil e o material de enchimento são considerados desprezíveis. A geometria do tubo após seu preenchimento é apresentada conforme a Figura 2.8.

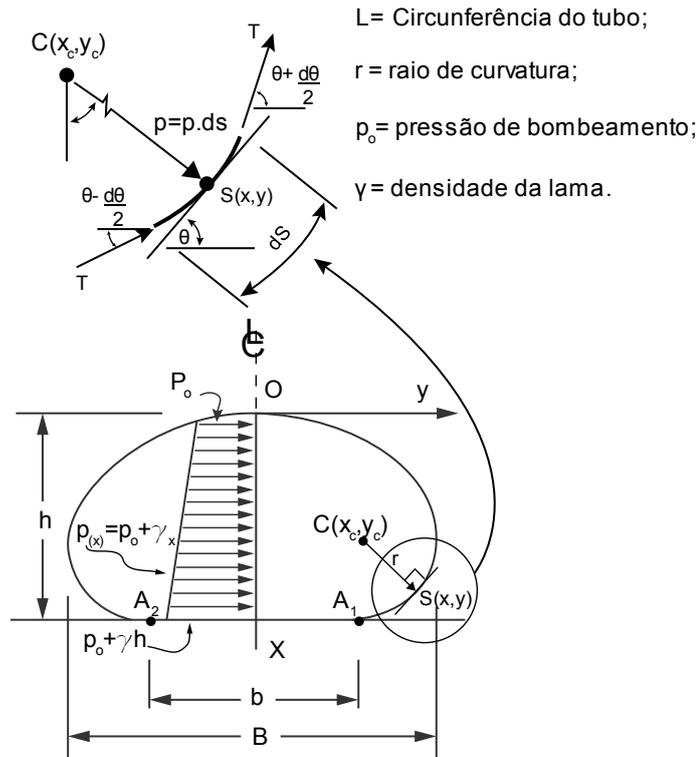


Figura 2.8 - Seção transversal do tubo (modificado de Leshchinsky *et al.*,1996)

A determinação da forma do tubo de geotêxtil, segundo os autores, é definida de acordo com a equação (2.1).

$$T \cdot y'' - (p_0 + \gamma \cdot x) \cdot [1 + (y')^2]^{\frac{3}{2}} = 0 \quad (2.1)$$

onde, T é a força de tração tangencial no geotêxtil; p_0 é a pressão de injeção durante o enchimento; y e x referem-se às coordenadas no ponto do tubo; e γ é peso específico do material de enchimento e H é a altura total do tubo.

A equação (2.1) não apresenta uma solução fechada, portanto, a sua solução deve ser resolvida de forma numérica. Assim, admitindo-se que o valor de γ é conhecido e um dos valores de T , H ou p_0 é arbitrado, os outros dois parâmetros de projeto restantes são determinados como parte da solução das equações que governam o problema.

Deve-se admitir condições de fronteira na solução. A primeira restrição é a condição de contorno geométrica no ponto O (Figura 2.8), o que, por simetria, resulta em:

$$\frac{1}{y'(0)} = 0 \quad (2.2)$$

A segunda restrição pode ser introduzida por meio da especificação do comprimento da base plana b (Figura 2.8) como:

$$b = \frac{2\gamma}{p_o + \gamma h} \int_0^h y(x) dx \quad (2.3)$$

O perímetro L , é dado por:

$$L = \frac{2\gamma}{p_o + \gamma h} \int_0^h y(x) dx + 2 \int_0^h [1 + (y')^2]^{1/2} dx \quad (2.4)$$

A força de tração axial (Figura 2.8) é dada por:

$$T_{axial} = (2/L) \int_0^h (P_o + \gamma x)y(x) dx \quad (2.5)$$

Os autores determinaram, por meio de um estudo paramétrico do método, que o fator mais crítico numa construção com a técnica de enchimento de tubos de geotêxtil é a pressão de bombeamento. Este fator pode levar a um aumento das deformações no geotêxtil.

Outra análise de tubos de geotêxtil em duas dimensões foi desenvolvido por Plaut & Suherman (1998), que consideram o tubo como uma membrana com peso e extensibilidade desprezíveis, sobre uma fundação rígida e submetido a pressão hidrostática interna. De acordo com a Figura 2.9, o equilíbrio na direção tangencial e normal e considerações geométricas, levam às seguintes equações:

$$\frac{dT}{dS} = Q \quad (2.6)$$

$$T \frac{dT}{dS} = P \quad (2.7)$$

$$\frac{dX}{dS} = \cos \theta \quad (2.8)$$

$$\frac{dY}{dS} = \sin \theta \quad (2.9)$$

Onde Q é a força tangencial por unidade de área, P é a pressão interna, T é a tensão circunferencial, θ é o ângulo entre a horizontal e a tangente ao tubo, X é a coordenada horizontal, Y a coordenada vertical e S é comprimento do arco.

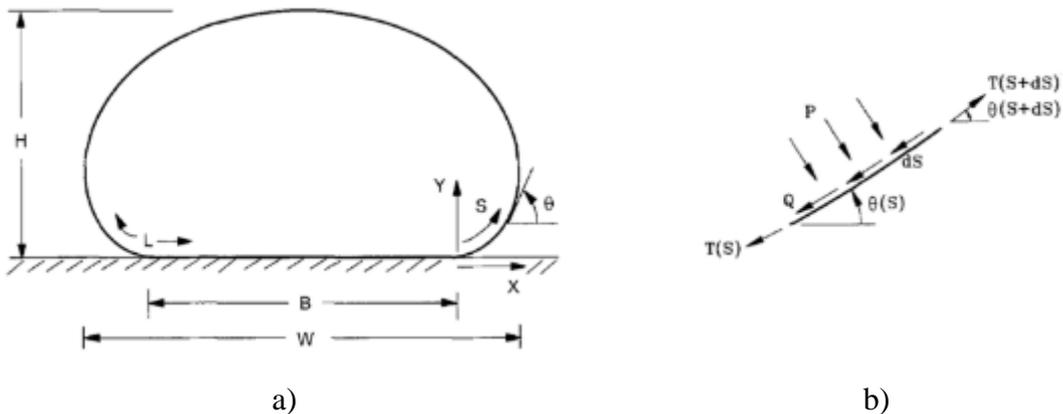


Figura 2.9 - Seção transversal do tubo sobre fundação rígida. a) Geometria da seção; b) Elemento infinitesimal do geotêxtil (Plaut & Suherman, 1998)

Considerando a solução em termos de pressão na base do tubo, a resolução envolve integrais elípticas do primeiro e segundo tipo, de acordo com a equação (2.10).

$$2[K(k) - E(k)]p_{bot} = 1 \quad (2.10)$$

onde, $K(k)$ é a integral elíptica completa do primeiro tipo, $E(k)$ é a integral elíptica completa do segundo tipo e p_{bot} é a pressão na base.

O parâmetro k é definido pela equação (2.11):

$$k = \frac{2\sqrt{t}}{p_{bot}} \quad (2.11)$$

onde t é um valor adimensional que é obtido da solução da equação (2.10).

As soluções permitem o cálculo da seção transversal e a tensão desenvolvida na circunferência em função da pressão gerada na base da estrutura ou no topo. Tais soluções também foram obtidas para as seguintes condições: tubos submersos parcial ou completamente em outro fluido, tubos apoiados em fundações deformáveis e problemas assimétricos que consideravam a estrutura como um dique submetido a uma pressão externa em um dos lados do tubo.

Cantré (2002), baseado no método de Plaut & Suherman (1998) e no método de elementos finitos, propõe diagramas para o cálculo da tensão máxima e altura de tubos de geotêxtil. Desta forma, os resultados obtidos pelo autor introduzem uma maneira simples de aproximação de medidas no projeto, embora desvios consideráveis podem ser apresentados para diâmetros muito grandes.

Por outro lado, Plaut & Filz (2008) determinaram as tensões tanto de tubos empilhados quanto para tubos isolados. Segundo esses estudos, é possível determinar uma aproximação da tensão circunferencial em um tubo de geotêxtil em uma configuração empilhada. Os autores concluíram ainda que a tensão desenvolvida para os tubos isolados e tubos empilhados foi maior para aqueles que estão sobre uma base deformável do que aqueles sobre uma base rígida.

Outra proposta de cálculo foi desenvolvido por Cantre & Saathoff (2011) para o cálculo da geometria e das tensões dentro do tubo. Os autores utilizaram o método de Plaut & Suherman (1998) estendido, em que consideravam um comportamento de material elástico não linear do material geossintético. A solução foi avaliada por meio da análise de sensibilidade e verificações no laboratório, em escala reduzida, por meio da técnica de medição fotogramétrica de baixo custo e alta precisão. A comparação entre resultados provou ser eficiente, de modo que tanto o método de medição quanto o método de cálculo foram satisfatórios.

Guo *et al.*, (2013) propuseram um novo método analítico para determinar a seção transversal e a força desenvolvida em uma camada de geofôrma. Neste estudo, as soluções propostas são apenas aplicáveis às geofôrmas impermeáveis preenchidas com lama e água apoiado sobre uma base rígida. Para tanto, foram realizadas uma série de testes para uma única geofôrma impermeável preenchida com água para verificar o método analítico proposto. Assim, a seção transversal obtida a partir das soluções fechadas concordou bem com os dados obtidos nos testes, mas para o caso das forças de tração os resultados se mostraram dispersos.

Uma proposta de projeto preliminar para tubos geossintéticos impermeáveis sobre uma base rígida foi fornecida por Guo *et al.*, (2014). A solução analítica proposta pelos autores consiste numa série de equações simplificadas nas quais são ajustadas por meio do modelo de Chapman-Richards. De acordo com a solução, é possível obter a altura (H), seção transversal (A), largura da base (B) e tensão no e geotêxtil (T), como mostrado na Figura 2.10.

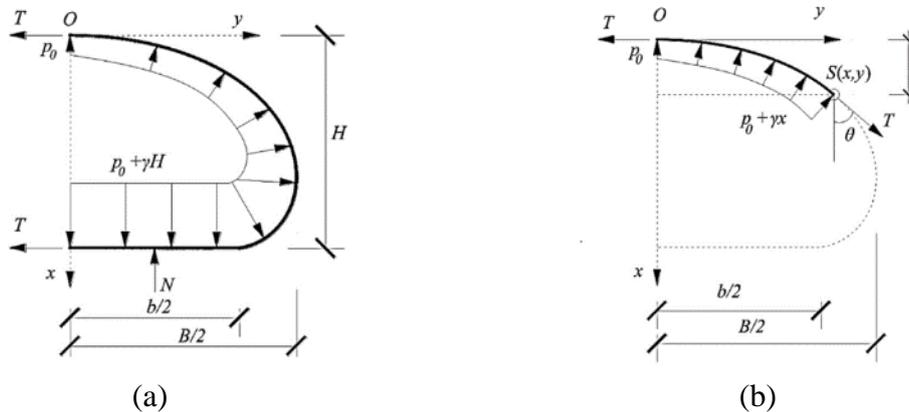


Figura 2.10 - Diagrama de corpo livre de tubos de geotêxtil em fundação rígida; (a) corpo livre de meia seção transversal, (b) corpo livre da curva OS (Guo *et al.*,2014)

Onde os valores H , A , B e T , são obtidos segundo as equações apresentadas na sequência:

$$H = 0,318L \left(1 - e^{-\frac{2,114p_0}{\gamma L}} \right)^{0,188} \quad (2.12)$$

$$A = 0,08L^2 \left(1 - e^{-\frac{6,504p_0}{\gamma L}} \right)^{0,134} \quad (2.13)$$

$$B = 0,5L - 0,1817L \left(1 - e^{-\frac{2,138p_0}{\gamma L}} \right)^{0,204} \quad (2.14)$$

$$b = 0,5L - 0,5L \left(1 - e^{-\frac{0,937p_0}{\gamma L}} \right)^{0,242} \quad (2.15)$$

$$T = 0,159p_0L \left(1 - e^{-\frac{2,114p_0}{\gamma L}} \right)^{0,188} + 0,025L \left(1 - e^{-\frac{0,937p_0}{\gamma L}} \right)^{0,242} \quad (2.16)$$

onde L é o perímetro do tubo e p_0 é a pressão de bombeamento.

Deve-se atentar que o método de ajuste de curvas, segundo os autores, não representa de forma adequada os casos em que os tubos de geotêxtil encontram-se submersos parcial ou

completamente com água. No entanto, os resultados obtidos nos casos de tubos isolados compararam bem com outros métodos nos quais o uso do computador é indispensável para encontrar a solução, como é o caso do método de Leshchinsky *et al.*, (1996).

Górniak *et al.*, (2016) utilizaram um modelo numérico acoplado de elementos finitos e elementos discretos. O modelo de elementos finitos (FEM) foi empregado para simular o material geossintético e o modelo de elementos discretos (DEM) foi utilizado para caracterizar o comportamento das partículas do material granular. Com o modelo DEM é possível considerar as forças volumétricas (peso das partículas) e as forças de contato no processo numérico. Também, relações entre forças de contato e sobreposição são usadas para introduzir condições de contorno. Segundo os resultados obtidos, os autores concluíram que o modelo numérico pode ser empregado para estudar o comportamento dos tubos geotêxteis em condições de contorno complexas. No entanto, o tempo de computação para realizar o processo de modelagem numérica de toda a estrutura ainda é muito grande.

Hamad *et al.*, (2017) tratam o problema dinâmico e de grandes deformações na interação fluido-sólido-geomembrana pelo uso do método do ponto material (Material Point Method-MPM). Os autores aplicam o método a problemas de determinação da forma dos tubos de geotêxtil, colapso da coluna de água e, finalmente, ao problema de instalação de um “*geocontainer*” no leito de um reservatório de água. Os resultados numéricos obtidos foram comparados com os resultados experimentais e analíticos, os quais apresentaram-se próximos.

2.3 ANÁLISE DE DESAGUAMENTO EM TUBOS DE GEOTÊXTEIS

O processo de desaguamento de um tubo geotêxtil envolve o movimento da água de dentro do tubo para fora através do invólucro de geotêxtil. Um parâmetro fundamental é a taxa de desaguamento (a taxa de descarga de água através da superfície do tubo), que governa a redução do volume (e aumento da concentração de sólidos) ao longo de um período de tempo específico (Yee & Lawson, 2012).

Testes de campo e de laboratório são importantes para avaliar o desempenho de desaguamento de tubos geotêxteis antes da implementação em grande escala. O desempenho de desaguamento de tubos geotêxteis pode ser avaliado com base nos seguintes critérios (Bhatia *et al.*, 1996; Yee & Lawson 2012).

- Redução de volume: Atingir uma redução do volume da lama para assim obter um ganho na concentração de sólidos para um determinado volume de entrada;
- Retenção: A perda inicial de sólidos, após o início da desidratação, deve estacionar em

um curto período de tempo;

- Qualidade do efluente: A qualidade do efluente deve atender aos padrões da regulamentação ambiental, caso o efluente não seja tratado antes do lançamento no meio ambiente;
- Anti-colmatação: Para não interferir no processo de desaguamento e redução de volume, o tubo de geotêxtil não deve sofrer colmatação.

2.3.1 PROCESSO DE DESAGUAMENTO DE TUBOS GEOTÊXTEIS

Três fases podem ser identificadas no processo de desaguamento de geotêxteis: fase de enchimento, fase de rebaixamento e fase de consolidação. A fase de enchimento é definida como a fase em que a lama é introduzida dentro do tubo geotêxtil, o processo de desaguamento acontece durante essa etapa.

De acordo com Ratnayesuraj & Bhatia, (2018), a fase de rebaixamento ocorre quando a água livre dentro do tubo continua a escoar pelo efeito da gravidade e uma combinação de pressões internas ou externas. O rebaixamento mais significativo começa no final da fase de enchimento (altura ou volume máximo do tubo foi atingida), e continua até o início da próxima fase de preenchimento. Assim, uma vez finalizadas várias fases de enchimento e rebaixamento, o processo ou fase de consolidação é iniciado (Figura 2.11).

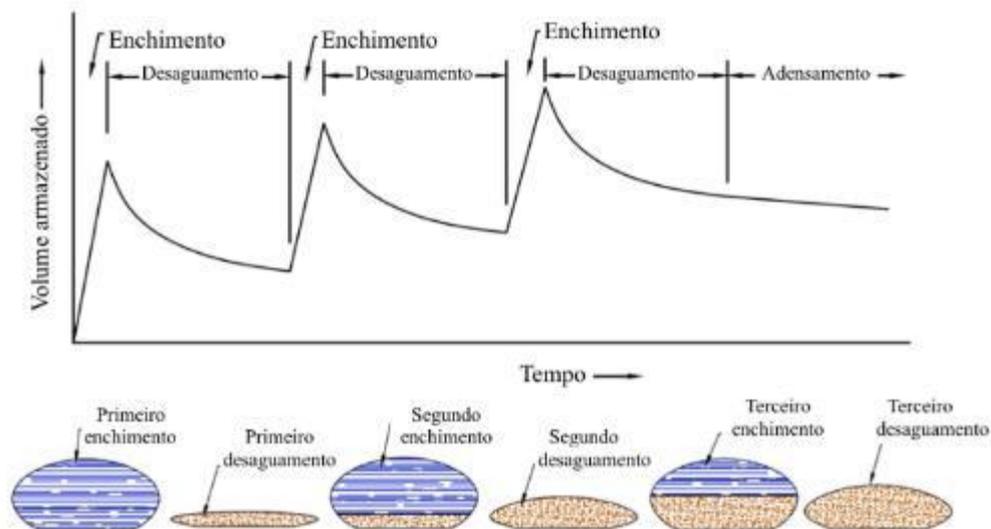


Figura 2.11 - Fases do processo de desaguamento do tubo geotêxtil (modificado de Ratnayesuraj & Bhatia, 2018)

2.3.2 FASES DE ENCHIMENTO

Yee & Lawson (2012) apresentaram um modelo para o processo de desaguamento de tubos geotêxteis durante as fases de enchimento. O modelo descreve a taxa de desaguamento

como uma razão da taxa de bombeamento, conforme:

$$A_p = \frac{Q_{out,f}}{Q_{in}} * \frac{1}{n_{in}} \quad (2.17)$$

onde $Q_{out,f}$ é a taxa de desaguamento durante o enchimento do tubo, Q_{in} é a taxa de bombeamento do volume que entra no tubo, A_p é um fator de qualidade do aglomerado e/ou flóculo e n_{in} é a porosidade da lama que entra no tubo.

Segundo Yee *et al.*, (2012) o fator de qualidade do aglomerado e/ou flóculo A_p é uma constante empírica que representa os fatores que influenciam a taxa de desaguamento (propriedades do solo, do geotêxtil ou aplicação de tratamento químico acelerador), ou seja, representa a eficácia do processo de desidratação. De acordo com os autores, um valor de $A_p > 0,5$ indica uma alta porcentagem de sólidos de sedimentação na lama, ou que um tratamento acelerador químico eficaz foi aplicado. Por outro lado, $A_p < 0,5$ indica uma alta porcentagem de sólidos dispersos na lama e um tratamento acelerador químico não foi aplicado ou foi ineficaz.

A taxa média de desaguamento durante a fase de enchimento inicial, $Q_{out,f}$, pode ser calculada pela equação:

$$Q_{out,f} = \frac{Q_{in} * t - V_T}{t} \quad (2.18)$$

onde Q_{in} é a taxa de bombeamento, V_T é o volume máximo contido no final de uma fase de enchimento e t é a duração da fase de enchimento. No caso de fases de enchimento subsequentes, a equação 2.18 é modificada da seguinte forma:

$$Q_{out,f} = \frac{Q_{in} * t_{fm} - (V_{T,max(m)} - V_{TO(m)})}{t_{fm}} \quad (2.19)$$

onde t_{fm} é a duração de enchimento do n -ésimo enchimento e $V_{TO(m)}$ e $V_{T,max(m)}$ são volumes contidos no início e no final da n -ésima fase de enchimento, respectivamente.

Por outro lado, a porosidade da lama na zona de suspensão dentro do tubo geotêxtil é a mesma da lama que entra. Assim, a porosidade, n_{in} , pode ser determinada a partir da concentração de sólidos (em peso), pela equação (Yee & Lawson, 2012):

$$n_{in} = \frac{G * (1 - S)}{G * (1 - S) + S} \quad (2.20)$$

onde G é a gravidade específica da lama ou do solo usado para fazer a mistura, e S é a concentração de sólidos da lama.

Yee *et al.*, (2012) desenvolveram uma relação empírica que define o volume de um tubo de geotêxtil em função do comprimento, altura de enchimento e diâmetro teórico. A relação desenvolvida foi comparada com as análises de Leshchinsky *et al.*, (1996) e Palmerton (2002),

obtendo-se resultados precisos para razões de altura de enchimento $h_T/D_T < 0,7$, e é dada por:

$$V_T = L_T * D_T^2 * \left[\left(\frac{h_T}{D_T} \right)^{0,815} - \left(\frac{h_T}{D_T} \right)^{8,6} \right] \quad (2.21)$$

onde V_T é o volume contido, L_T é o comprimento do tubo geotêxtil, h_T é a altura preenchida ou atingida e D_T é o diâmetro teórico do tubo geotêxtil. De acordo com os autores, a equação (2.21) é de uso particular na prática, onde as mudanças no volume do tubo (V_T) são normalmente calculadas diretamente a partir das mudanças registradas na altura h_T .

2.3.3 FASES DE REBAIXAMENTO

Considera-se que a fase de rebaixamento começa assim que o fluxo de entrada para o tubo é interrompido e as condições de fluxo mudam de turbulenta para laminar. Por tanto, assumindo a transição das condições de fluxo como uma mudança instantânea, a fase de rebaixamento pode ser modelada sob condições laminares (Ratnayesuraj & Bhatia, 2018).

Ademais, a porosidade da lama dentro do tubo diminuirá devido a redução do volume por conta da saída da água ao longo do tempo. Dessa forma, em qualquer intervalo de tempo $t-1$ a t a porosidade pode ser determinada a partir da mudança de volume dentro do tubo durante o mesmo intervalo de tempo (Figura 2.12).

$$n_t = 1 - \frac{(1 - n_{t-1}) * V_{T(t-1)}}{V_{T(t)}} \quad (2.22)$$

onde $V_{T(t)}$ é o volume e n a porosidade, da lama no final e início do intervalo de tempo $t-1$ a t .

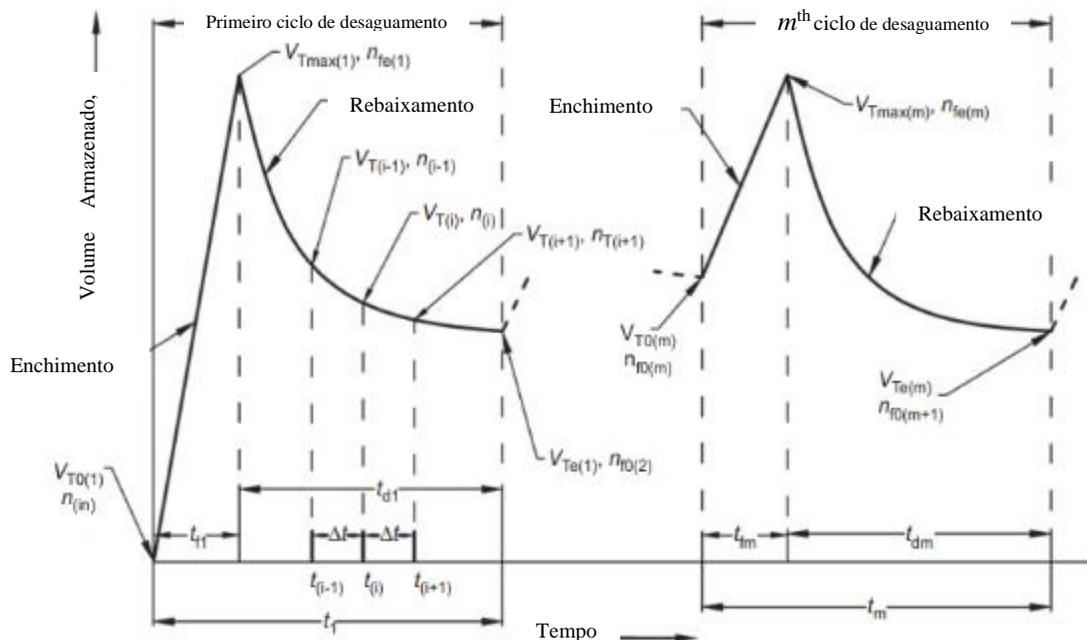


Figura 2.12 - Representação das fases subsequentes (modificado de Yee & Lawson 2012).

Outros estudos descrevem a taxa de sedimentação do material de enchimento (Richardson & Zaki, 1954; Patankar *et al.*, 2002; Ramsdell *et al.*, 2011; Yee & Lawson, 2012). Como exemplo, a equação de Richardson-Zaki tem sido utilizada por pesquisadores para descrever a taxa de sedimentação de sólidos suspensos na água, e mais recentemente em engenharia hidráulica e costeira (e.g. Patankar *et al.*, 2002; Ramsdell *et al.*, 2011). Uma forma semelhante à equação foi usada por Yee & Lawson (2012) como:

$$\frac{\Delta h_T}{\Delta t} = -n_x^q \quad (2.23)$$

onde Δh_T é a mudança na altura do tubo geotêxtil ao longo do intervalo de tempo Δt , n_x é a porosidade média da lama dentro do tubo durante o mesmo intervalo de tempo Δt , e q é o fator de potência empírico para a fase de rebaixamento.

Segundo Yee & Lawson (2012) o processo típico de desaguamento de tubos geotêxteis segue uma série de ciclos de enchimento e rebaixamento. Contudo, fases iniciais podem ser analisadas, os quais são definidas a seguir.

2.3.4 FASE INICIAL DE ENCHIMENTO

Se o fator de fase de enchimento, A_p , e o fator de fase de rebaixamento, q , forem conhecidos, as curvas de desaguamento podem ser simuladas para uma combinação específica de lama e geotêxtil. O tempo da primeira fase de enchimento, $t_{f(1)}$, pode ser determinada utilizando a seguinte equação:

$$t_{f(1)} = \frac{V_{T*\max(1)}}{Q_{in(1)} - Q_{out,f(1)}} \quad (2.24)$$

onde $V_{T*\max(1)}$ é o volume de lama dentro do tubo na altura $h_{T*\max(1)}$, utilizado como 55% do diâmetro teórico do tubo geotêxtil (Lawson 2008), $Q_{in(1)}$ é a taxa de bombeamento, e $Q_{out,f(1)}$ é a taxa de desaguamento durante a fase inicial de enchimento. $Q_{out,f(1)}$ pode ser definido reorganizando a equação 2.17, desde que A_p e n_{in} , sejam conhecidos.

A fase de enchimento pode ser admitida como uma variação linear, tendo o ponto inicial como (0, 0) e o ponto final como $[t_{f(1)}, V_{T*\max(1)}]$, conforme mostrado na Figura 2.12. A porosidade da lama no final da fase de enchimento inicial $[n_{fe(1)}]$ é calculada por:

$$n_{fe(1)} = 1 - \frac{(1 - n_{in}) * Q_{in(1)} * t_{f(1)}}{V_{T*\max(1)}} \quad (2.25)$$

2.3.5 FASE INICIAL DE REBAIXAMENTO

De acordo com a Figura 2.13, o processo de rebaixamento inicia na altura $h_{Tmax(1)}$ e diminui até a altura $h_{Te(1)}$, com período de tempo de t_{d1} . Essa fase inicial de rebaixamento pode ser modelada por meio de um procedimento numérico de passo de tempo que divide o período de tempo de rebaixamento, t_{d1} , em pequenos incrementos de tempo, Δt .

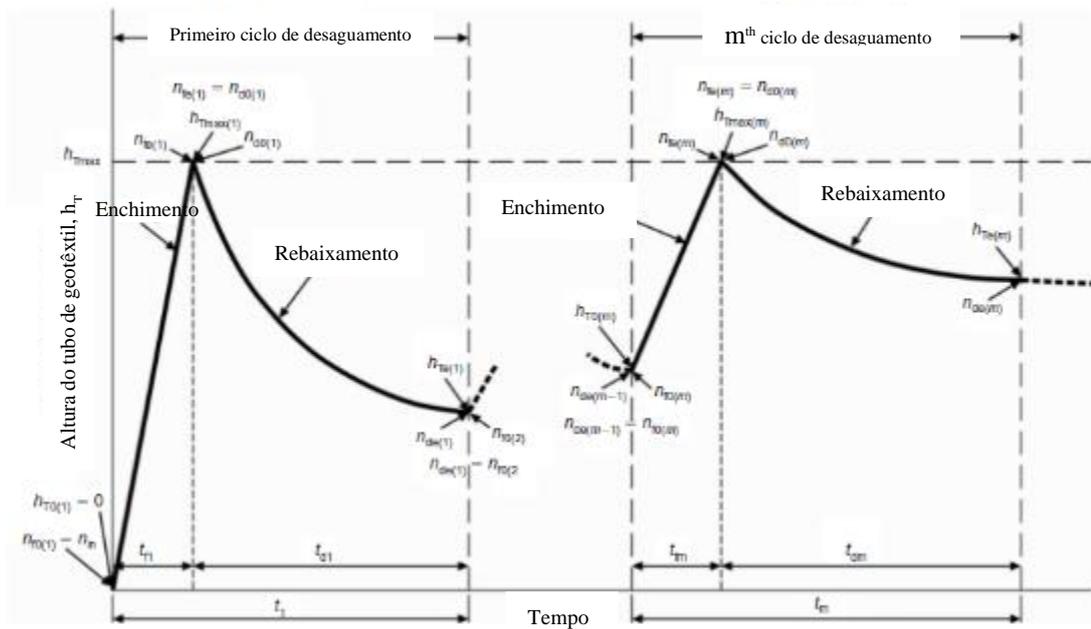


Figura 2.13 - Parâmetros usados no modelo analítico do processo de desaguamento (modificado de Yee & Lawson, 2012).

Dessa forma, para valores conhecidos de altura do tubo, volume e a porosidade da lama no incremento de tempo $i-1$, Yee & Lawson (2012) propõem um rearranjo dos parâmetros da equação 2.23 para obter uma aproximação da altura do tubo no próximo incremento de tempo i .

$$h_{T(i)} = h_{T(i-1)} - n^q_{(i-1)} * \Delta t \quad (2.26)$$

onde o valor escalonado anterior da porosidade contida, $n_{(i-1)}$, é utilizado, em vez da porosidade média, n_x . Quando o tempo de rebaixamento é dividido em incrementos pequenos de tempo, se evita o pequeno erro de cálculo na aproximação, obtendo-se uma curva e uma concentração final de sólidos mais precisa. Dessa forma, o valor de $h_{T(i-1)}$ pode então ser determinado encontrando o próximo valor de porosidade $[n_{(i)}]$ utilizando a equação (2.22).

2.3.6 FASES SUBSEQUENTES DE ENCHIMENTO E REBAIXAMENTO

Segundo Yee & Lawson (2012), as fases de enchimento subsequentes seguem o mesmo procedimento da fase de enchimento inicial (Figura 2.12 e Figura 2.13), completando parcialmente o tubo antes do início da fase de preenchimento. Por outro lado, a taxa de desaguamento permanece a mesma durante as fases de enchimento subsequentes e muda apenas se a taxa de lama ou a concentração de sólidos de entrada varia.

Assim, a porosidade da pasta no final da n -ésima fase de enchimento pode ser determinada usando a seguinte equação:

$$n_{fe(m)} = 1 - \frac{(1 - n_{in}) * Q_{in(m)} * t_{fm} + (1 - n_{f0(m)}) * V_{T0(m)}}{V_{T*max(m)}} \quad (2.27)$$

onde $n_{fe(m)}$ e $V_{T*max(m)}$ são a porosidade e o volume contido, respectivamente, no final da n -ésima fase de enchimento, $n_{f0(m)}$ e $V_{T0(m)}$ são a porosidade e o volume contido, respectivamente, no início da n -ésima fase de enchimento, e n_{in} , $Q_{in(m)}$ e t_{fm} são a porosidade, a taxa de bombeamento e a duração do enchimento da n -ésima fase de enchimento (Figura 2.12).

Por outro lado, nas condições de rebaixamento o fator de potência empírico q não é influenciado pelo número de fases correspondentes (Yee & Lawson, 2012). Portanto, o mesmo procedimento numérico de passo de tempo pode ser aplicado a cada fase de rebaixamento subsequente.

Assim, a equação (2.28) abaixo pode ser usada para encontrar o volume total de lama desidratada de um tubo geotêxtil (volume de efluente) de várias fases de enchimento e rebaixamento.

$$V_{Te(t)} = \sum_{i=1}^m (Q_{in(i)} * t_{f(i)}) - V_{out(t)} \quad (2.28)$$

onde V_{Te} é o volume de lama contida em qualquer instante t , V_{out} é o volume de efluente de água drenado para fora do tubo no tempo t , Q_{in} é a vazão de polpa de entrada, t_f é o tempo necessário para completar um enchimento e m é o número de enchimentos realizados.

Segundo Ratnayesuraj & Bhatia (2018), este modelo analítico requer que pelo menos um teste com fases únicas de enchimento e desaguamento seja realizado para determinar os ditos parâmetros.

2.4 APLICAÇÕES DE TUBOS DE GEOTÊXTEIS

2.4.1 SOLUÇÕES PARA O DESSECAMENTO DE LODOS E ESGOTO

A capacidade filtrante que os diferentes geotêxteis (tecidos ou não tecidos) possuem é uma das características que tem permitido o desenvolvimento de diversas técnicas aplicadas a obras de proteção ambiental nas últimas décadas. A dificuldade no manejo das grandes quantidades de materiais com alta porcentagem de finos e alto teor de água como consequência de processos tais como os de mineração, tratamento de águas residuais, agricultura, instalações industriais, entre outras, têm promovido o emprego de tubos de geotêxteis.

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas dirigidas ao estudo de fatores que intervêm no processo de desaguamento. Moo-Young *et al.*, (2002) estudaram a compatibilidade de filtração de vários tipos de geotêxteis para altos teores de água no material de preenchimento avaliando a viabilidade e eficiência de tubos. A eficiência do sistema também foi estudada por Muthukumarán & Ilamparuthi (2006), que definiram um teor crítico de água determinado com base no tamanho de abertura do geotêxtil e valores de tamanho de partícula da lama.

Outros procedimentos têm sido utilizados com o intuito de acelerar os processos de desaguamento. Maurer *et al.*, (2012) avaliaram a influência do uso de floculantes poliméricos e geofibras no desaguamento de resíduos de combustão de carvão produzidos nos processos de geração de energia, tendo melhorias significativas tanto na taxa de desaguamento quanto na resistência do material drenado.

Alguns exemplos quanto ao uso de polímeros foram registrados por Guerdat *et al.*, (2013) onde foram utilizados sistemas de bolsas geotêxteis com auxílio de floculantes para capturar e desaguar resíduos sólidos de efluentes de sistemas de recirculação de aquicultura (RAS). Por outro lado, Berilgen & Bulut (2015) avaliaram a viabilidade e fatores de influência quanto ao uso de polímeros aniônicos e catiônicos no desaguamento de lama dragada com alto e baixos teores de água. Em todos os casos, concluiu-se sobre a importância de escolher o aditivo mais adequado ao perfil químico e físico do material que vai ser tratado. Para tanto, alternativas de aterros ou estruturas de retenção como resultado do processo de desaguamento foram propostos por Karadoğna *et al.*, (2021), onde a escolha do floculante e a quantidade a ser utilizada (Karadoğna *et al.*, 2020), simultaneamente com a avaliação do uso combinado do tubo (Berilgen & Bulut 2015), fornecem contribuições econômicas significativas. Porém, um padrão de carregamento deve ser determinado.

Casos de tubos geotêxteis utilizados no Brasil para o desaguamento de lodos de tanque

séptico são apresentados por Castro *et al.*, (2008). Os autores apresentaram trabalhos de campo utilizando tubos para o desaguamento de lodo coletado de fossas sépticas e de lixiviados de aterro sanitário na cidade de Rio das Ostras, no Rio de Janeiro. A técnica foi utilizada para reduzir e descartar grandes volumes de lodo gerados na cidade decorrente do aumento da população. Na Figura 2.14 é apresentada a disposição dos tubos de geotêxtil. Segundo os autores, o lodo filtrado foi monitorado quanto à aceitabilidade dos parâmetros químicos para posteriormente serem descartados ou retornar ao sistema de tratamento de lodos. Como resultado final após o tratamento, parte dos filtrados foram utilizados para jardinaria da Cidade das Ostras e outra parte foi utilizada na compactação de um aterro.



Figura 2.14 - Tubos de geotêxteis para o dessecamento de lodos na Cidade de Rio das Ostras, RJ, Brasil (Castro *et al.*, 2008)

Posteriormente Guimarães *et al.*, (2014) indicaram a importância e a eficiência no desaguamento utilizando sistemas fechados geotêxteis na redução do volume de lama para a sua disposição final. Os sistemas estudados podem ser considerados como um único método de tratamento ou como aprimoramento de métodos pré-existentes.

Ardila *et al.*, (2020) desenvolveram ensaios a partir de tubos de geotêxtil tecido e não tecido, por meio de desaguamento de lodos em uma estação de tratamento de água com o intuito de avaliar a eficiência do sistema quanto as partículas sólidas depositadas nos corpos d'água. Assim, para as condições de ensaio desenvolvidas pelos autores, observaram melhor desempenho de desaguamento para os tubos fabricados com geotêxtil não tecido.

2.4.2 QUEBRA ONDAS E PREVENÇÃO DA EROSÃO COSTEIRA

As erosões desenvolvidas nas áreas costeiras têm causado muitos danos aos litorais e às propriedades costeiras no Brasil. Além disso, o custo das estruturas costeiras para proteção é

cada vez mais elevado. Porém, os materiais empregados nas estruturas hidráulicas e costeiras estão mudando para elementos mais econômicos, sendo a tecnologia dos tubos de geotêxtil uma alternativa que fornece uma solução efetiva.

Os tubos de geotêxtil, preenchidos hidráulicamente ou mecanicamente com materiais de dragagem, têm sido aplicados em engenharia hidráulica e costeira. A tecnologia do tubo de geotêxtil, além de ser utilizada no controle da água nas inundações, também é recomendada para proteger e recuperar costas com problemas de erosão e para estocagem de resíduos industriais no sentido de reduzir os níveis de toxicidade dos rejeitos (Ortiz *et al.*, 2003).

Os tubos de geotêxteis preenchidos com material de dragagem têm sido usados na construção de diques e quebra ondas em vários projetos ao redor do mundo, e o seu uso neste campo está em crescimento. Algumas das vantagens desta tecnologia é que ela pode utilizar materiais de enchimento *in situ* por bombeamento hidráulico, e ainda pode ser implementada com custos baixos e a construção pode ser ainda mais rápida comparada com outras técnicas tradicionais (Oh & Shin, 2006).

De acordo com Alvarez *et al.*, (2007), no caso da costa nordeste do México (Yucatan) foi adotada uma solução técnica usando tubos de geotêxtil. O objetivo foi gerar um processo de acúmulo de areia sem interromper o transporte de sedimentos ao longo da costa. O tubo foi considerado adequado para o projeto de restauração da praia, já que ele cumpre a função de reduzir a energia da onda por meio do controle do processo de quebra de onda até o nível requerido para manter o balanço dinâmico adequado no litoral. Segundo esses autores, os resultados dos trabalhos demonstraram que o uso de tubos de geotêxtil representa uma alternativa eficiente e amigável para o ambiente na estabilização no litoral.

Por outro lado, processos erosivos severos decorrente do impacto das ondas na linha costeira da Malásia, levou à deterioração da qualidade da praia e qualidade de terrenos valiosos. De acordo com o Lee & Douglas (2012), a instalação de tubos geotêxteis como um sistema de diques submersos (*offshore*) melhorou as condições da praia. Como resultado, foi proporcionado uma maior área de costa, gerando-se uma declividade mais suave do terreno e a profundidade da água na área costeira foi reduzida, propiciando uma diminuição da energia das ondas que impactam a linha costeira (Figura 2.15).

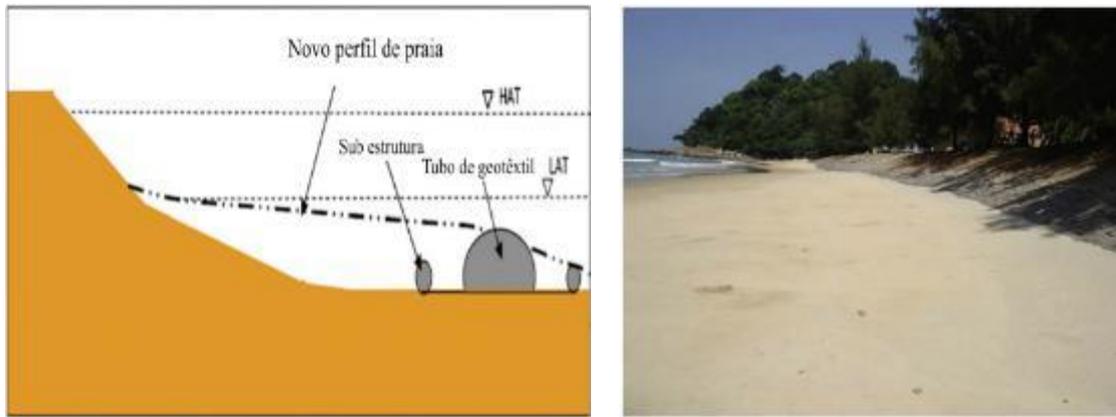


Figura 2.15 - Utilização de tubos de geotêxtil na proteção de linha costeira (modificado de Lee & Douglas, 2012).

Lee *et al.*, (2014) estudaram diferentes regiões tropicais para a proteção de costas com características arenosas e lamacentas. A preservação e reabilitação de praias por meio de tubos de geotêxtil são ambientalmente e economicamente viáveis, porém considerações no tipo de material e a resistência ao cisalhamento do leito são necessárias para o projeto.

Outros trabalhos de grande porte dirigidos na recuperação da linha costeira têm sido registrados na literatura em diversos países, tais como Vietnam (Yee, 2015), China (Luo *et al.*, 2016), Chile (Müller *et al.*, 2018), Coreia (Kim *et al.*, 2018) e Índia (Nishold *et al.*, 2018 e Sundar *et al.*, 2021).

Uma proposta que considera o movimento vertical e lateral do tubo denominado de “*areal method*”, e a teoria de grande deformação, que considera a deformação finita e a mudança do coeficiente de consolidação, foi introduzida por Kim *et al.*, (2018). Resultados obtidos por meio de ensaios de escala reduzida foram comparados com aqueles obtidos pela análise teórica mostrando boa concordância com os dados medidos.

De acordo com Kim *et al.*, (2016a), os estudos disponíveis na literatura sobre tubos geotêxteis são principalmente dirigidos com base em soluções analíticas e análises numéricas, estabilidade hidráulica e desempenho do geotêxtil em termos de resistência, durabilidade e permeabilidade. Contudo, pouco ainda é entendido sobre o comportamento de deformação dos tubos geotêxteis. Em outro trabalho, Kim *et al.*, (2016b) expõem que o conhecimento sobre o adensamento de tubos preenchidos de lamelas finas é ainda limitado, por isso a natureza do processo de adensamento precisa ser mais bem estudada.

2.4.3 USO DE GEOTÊXTEIS NA MINERAÇÃO

O tratamento e disposição de rejeitos produzidos por mineração (céu aberto e

subterrâneo) representam grandes desafios que demandam uma abordagem de estudo multidisciplinar, dado que levam a poluições ambientais, como falha de barragens de rejeitos, contaminação de águas subterrâneas e geração de água ácida (Johnson & Wright, 2003, Lottermoser, 2007).

As procuras constantes em desenvolver métodos alternativos visando reduzir as falhas de barragens e seus riscos ambientais subsequentes foram registradas por Verburg (2002); Driussi & Jansz (2006). De acordo com Bussière (2007) e Ritcey (2005), o descarte a seco usando rejeitos engrossados diminui os volumes de rejeitos *in situ*, assim como melhorar a recuperação de água. No entanto, de acordo com Yilmaz (2011), as técnicas podem ser caras e difíceis de implementar e controlar, e as suas viabilidades a médio e longo prazo estão em questão. É por isso que existe uma busca por métodos eficientes de reciclagem de rejeitos.

Segundo Yilmaz (2007) os volumes e os efeitos ambientais dos resíduos de mineração podem ser reduzidos utilizando métodos de hierarquia de resíduos. O método de hierarquia mais eficiente consiste primeiro em reduzir a produção de rejeitos, depois reciclar e reutilizar os mesmos sempre que possível (Yilmaz, 2011). Um fluxograma dos diferentes componentes da redução de volume de resíduos é apresentado conforme a Figura 2.16.

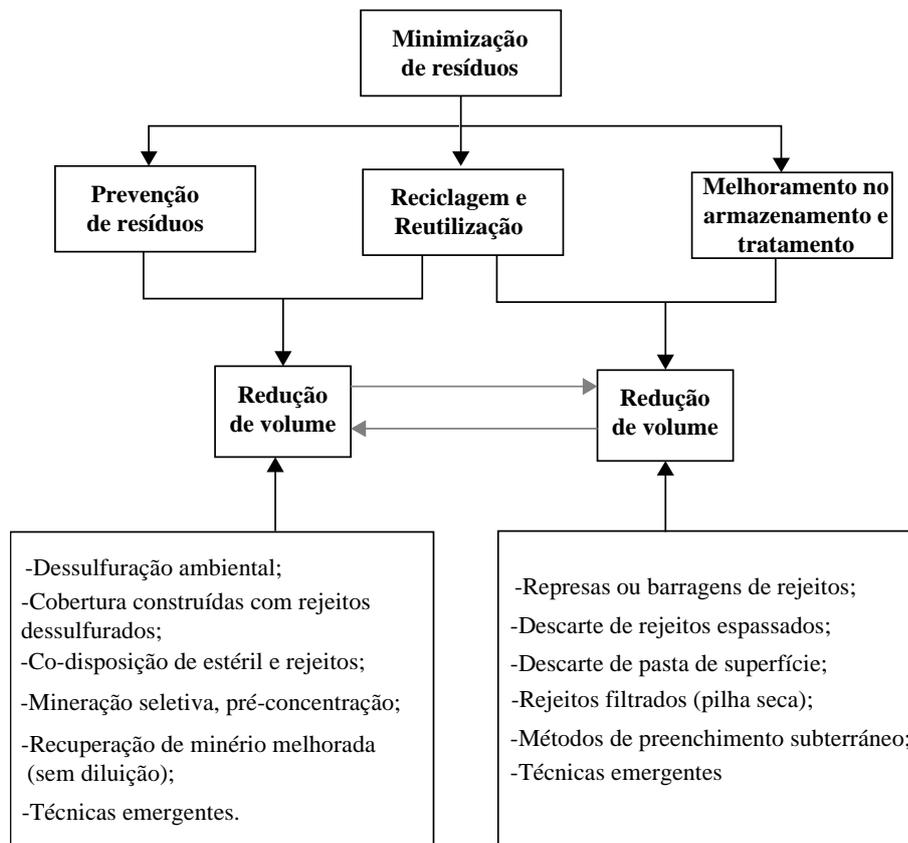


Figura 2.16 - Hierarquia da gestão de resíduos para redução de volume (Modificado de Yilmaz, 2011)

Algumas pesquisas foram desenvolvidas para investigar o efeito do material fibroso no processo de floculação e desague de resíduos finos de várias indústrias de mineração, incluindo fosfatos, caulim e bauxita. Várias técnicas de desaguamento foram investigadas, incluindo o engrossamento da sedimentação; filtração; centrifugação; desague em telas; e desague induzida por infiltração e consolidação. O processo desenvolvido parece oferecer uma série de vantagens para o meio ambiente, embora uma das principais questões seja reduzir a quantidade de água a ser utilizada no processo (El-Shall & Zhang, 2004).

Por outro lado, Hornsey *et al.*, (2010) mostraram que uma série de fatores devem ser considerados ao incorporar geossintéticos numa operação de mineração moderna, pois o contato com as águas residuais do processo de mineração, lixiviados com pH fortemente alcalino ou ácido e temperaturas elevadas tem o potencial de reduzir o desempenho do material a longo prazo.

Como alternativa emergente tem-se a utilização de tubos de geotêxteis aplicados na mineração. Uns dos primeiros casos registrados utilizando a técnica de tubos de geotêxtil no dessecamento de rejeitos foi apresentado por Newman *et al.*, (2004). A técnica foi utilizada como uma solução para os problemas de espaço na disposição dos rejeitos e a quantidade de rejeitos gerados pela mineradora, pois as técnicas usuais disponíveis resultariam inviáveis para a mina, principalmente por conta do tempo e custos envolvidos. De acordo com os autores, a incorporação do material de rejeito nos tubos de geotêxtil foi realizada com um teor de sólidos de 7%, sendo que após 10 dias de desaguamento foram registrados teores de sólidos de 65% (Figura 2.17). A implementação dessa técnica facilitou a forma em que os rejeitos foram dispostos, ao mesmo tempo em que representou em menor custo comparada às técnicas usuais.



Figura 2.17 - Dessecamento de rejeitos (Newman *et al.*, 2004)

Outro exemplo de uso de tubos de geotêxtil foi registrado na Mina de Talvivaara, considerada a maior mina de níquel e zinco a céu aberto da Europa, com uma vida útil de 46 anos. A técnica foi adotada como solução para o armazenamento ambientalmente sustentável

após vários testes de desaguamento bem sucedidos (Wilke *et al.*, 2015).

De acordo com Wilke *et al.*, (2015) ao organizar os tubos únicos em um padrão de grupo empilhado piramidal com várias camadas, a área ocupada pode ser efetivamente reduzida e o volume de armazenamento aumentado (Figura 2.18).



Figura 2.18. Empilhamento de rejeitos (Wilke et al.,2015)

Yang *et al.*, (2019) descrevem o caso da construção de uma barragem de rejeitos para disposição de rejeitos finos, localizada na China, utilizando o empilhamento de tubos de geotêxtil não tecidos com resistência à tração maior que 28 kN/m e massa por unidade de área de 150 g/m². A Figura 2.19 apresenta a barragem construída por meio do empilhamento com tubos de geotêxtil preenchidos com a mistura de rejeito e água. A estrutura de alteamento possuía três metros de altura, com largura da crista de 18 m, inclinação a montante de 1V:2H, uma inclinação a jusante de 1V:4H e a plataforma de talude externa com 4 m de largura. Assim, as investigações geotécnicas e análises de estabilidade do talude de rejeitos foram realizadas a fim de garantir a segurança do reservatório de rejeitos tanto na condição atual quanto na construção de alteamentos futuros. Dessa forma, foram comprovados resultados positivos quanto ao uso de tubos de geotêxtil preenchidos com rejeitos finos em barragens de rejeitos.

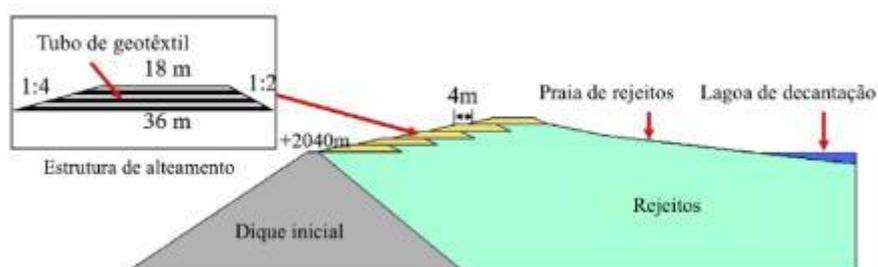


Figura 2.19 - Barragem de rejeitos construída com tubos geotêxteis (modificado de Yang *et*

al., 2019).

Silva (2017) estudou e avaliou o uso de tubos de geotêxteis tecidos, com resistência à tração de 100 kN/m e 554 g/m² de massa por unidade de área, para desidratar, confinar e empilhar rejeitos de minério de ouro. Foi construído um barramento não drenado dentro do reservatório de uma barragem de rejeitos de ouro com 14 tubos de 6 m x 2 m x 1 m de geotêxtil tecido empilhados e preenchidos com rejeito fino de ouro. A estrutura foi monitorada por 2 anos e posteriormente ela foi exumada para avaliação do desempenho em campo. Os ensaios iniciais para construção do barramento foram desenvolvidos com a adição de floculante aos rejeitos para evitar as perdas excessivas de finos durante os ensaios e a concentração de sólidos dos rejeitos confinados nos tubos foi avaliada por meio da coleta de amostras próximo a entrada da mistura. O estudo concluiu que o maior aumento no teor de sólidos ocorreu nas primeiras 24 horas de ensaio quando a concentração de sólidos aumentou de 53% para 75%. Dessa forma, cada tubo de geotêxtil utilizado no empilhamento, foi capaz de desaguar e confinar uma quantidade de 5,4 m³ de rejeitos.

Posteriormente simulações numéricas por elementos finitos foram desenvolvidas por Silva (2019) e Silva *et al.*, (2020) para verificar a pressão de bombeamento e a rigidez à tração do geotêxtil tecido em condições de campo. Verificou-se que a escolha do elemento finito na análise numérica é determinante na simulação do comportamento tensão-deformação do tubo geotêxtil. Assim, os autores concluíram que a pressão de enchimento tem influência direta tanto na forma da seção transversal do tubo quanto nas tensões geradas durante o processo de enchimento.

Moraes (2020) desenvolveu um programa de ensaios para amostras de rejeitos consolidados bem como amostras do tubo de geotêxtil exumados do empilhamento drenado construído por Silva (2017). Entre os principais resultados tem-se um aumento de 66% de concentração de sólidos no final do ensaio, chegando a uma densidade aparente seca de 1,8 t/m³. Dessa forma comprovou-se a eficiência do processo de disposição de rejeitos finos de mineração e sua viabilidade como estruturas seguras na mineração.

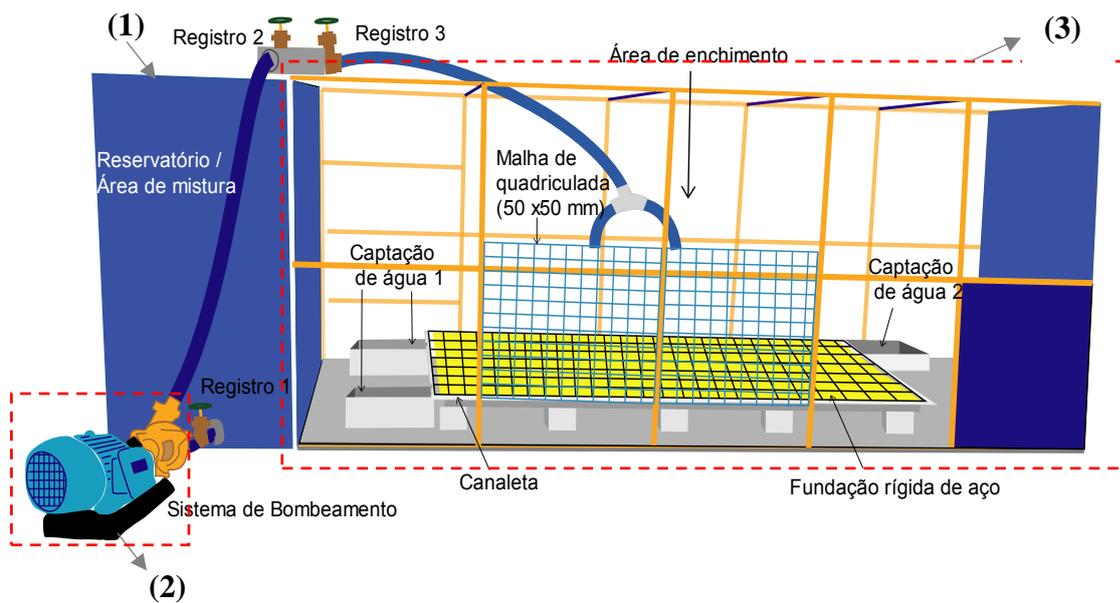
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo se apresenta o equipamento onde foi desenvolvida a pesquisa, assim como os materiais utilizados.

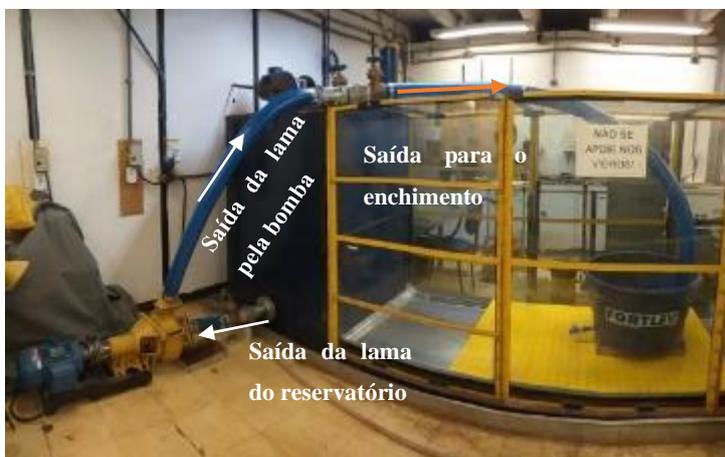
3.1 EQUIPAMENTO DE ENSAIO PARA O ENCHIMENTO DE TUBOS DE GEOTÊXTEIS

O equipamento utilizado nesta pesquisa consiste em um canal hidráulico com gerador de ondas, desenvolvido por Tatto (2014) no Laboratório de Geotecnia da UnB. O canal possui 6 m de extensão, 1 m de largura e 1,5 m de altura e é formado por chapas de aço nas extremidades e 10 painéis de vidro temperado de 1 m de comprimento. No entanto, para o desenvolvimento desta pesquisa, foi necessário realizar uma série de mudanças e adaptações no sistema existente. Na Figura 3.1a pode-se observar de forma geral parte das adaptações realizadas no canal hidráulico, sendo constituído de um reservatório (1), sistema de bombeamento (2) e uma área de enchimento (3).

Como complemento, a Figura 3.1(b) mostra o processo de passagem da lama até deposição no tubo. Para não haver sedimentação do material durante a mistura, adaptou-se uma tubulação a qual permitia a recirculação da lama (Figura 3.1c). Desta forma, o equipamento permitiu analisar e estudar o comportamento de tubos de geotêxteis quando preenchidos com uma mistura de líquidos e sólidos.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1 - Vista geral do canal hidráulico- (a) Desenho esquemático geral. (b) Vista da disposição do reservatório e bomba draga; (c) Parte do topo e lateral do sistema.

3.1.1 RESERVATÓRIO PARA PRODUÇÃO DE MISTURA

Uma área do canal hidráulico foi destinada para a estocagem do material e para a mistura líquido-sólido, sendo esta conformada por chapas de aço de 4 mm de espessura, com dimensões de 1 m de comprimento x 1 m de largura x 1,5 m de altura, conforme mostrado na Figura 3.2.

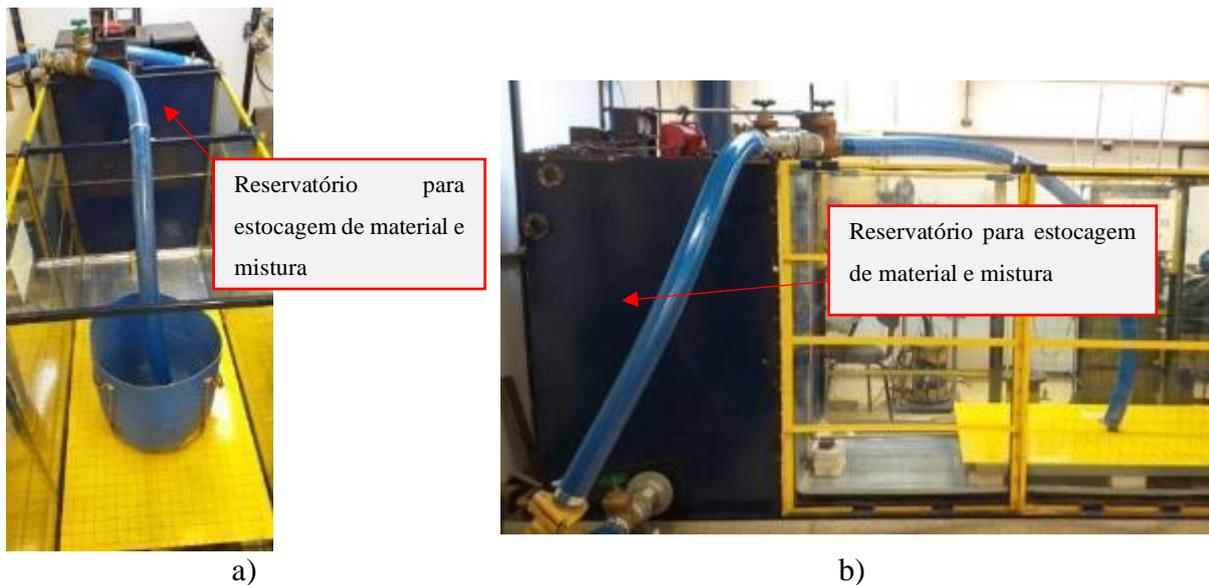


Figura 3.2 - Vista geral do canal hidráulico: (a) vista do reservatório dentro do canal; (b) vista lateral do reservatório.

O processo de mistura dentro do reservatório foi iniciado com baixas concentrações de sólidos, aumentando-se de forma gradativa até se atingir a concentração de 50%. O reservatório foi dividido por meio de uma chapa de aço móvel com dimensões de 0.98m x 0.75m e 2mm de espessura (Figura 3.3a). Dessa forma, um setor contendo água e um outro setor com o material sólido saturado era misturado lentamente no processo de recirculação (Figura 3.3b). Assim, conforme a chapa de aço era suspensa, a lama era formada por meio da impulsão da água (pela bomba draga) pelo sistema de recirculação, acrescentando-se sólidos sucessivamente.



Figura 3.3 - Reservatório e área de mistura; (a) chapa de aço suspensa dentro do reservatório, (b) separação da água e solo saturado antes do processo de mistura.

3.1.2 SISTEMA DE BOMBEAMENTO

O sistema de bombeamento é constituído por uma bomba draga instalada ao lado do canal hidráulico juntamente de um motor da marca WEG, com 3000 *watts* de potência (Figura 3.4). Além disso, o motor e a bomba foram acoplados por meio de uma luva elástica, para isso

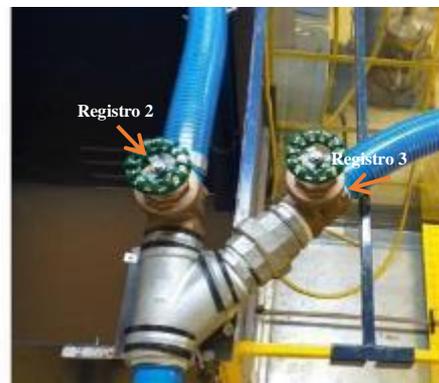
sendo necessária a construção de uma base metálica com o intuito de manter o eixo do motor e o eixo da bomba draga no mesmo nível. Destaca-se ainda a função principal da bomba draga que foi promover a mistura do material (sólido-água) no reservatório e levá-la até a área de enchimento dos tubos de geotêxteis. Destaca-se que foram utilizados 3 registros (Figura 3.5) que permitiram controlar tanto a vazão de saída do reservatório (registro 1 e 2) quanto a vazão de chegada do material na área de enchimento (registro 3).



Figura 3.4 - Sistema de bombeamento



(a)



(b)

Figura 3.5 - Vista da área de enchimento dos tubos de geotêxtil; (a) enchimento do tubo de geotêxtil, (b) registro de controle

3.1.3 ÁREA DE ENCHIMENTO DOS TUBOS DE GEOTÊXTEL

Uma outra área do canal foi destinada para o enchimento dos tubos de geotêxtil. Para tanto, foi necessário a instalação de uma base rígida conformada de uma chapa de aço com comprimento de 3,2 m, sustentada sobre uma estrutura metálica, e apoiada sob blocos de argamassa de acordo com a Figura 3.6 (a) e (b).

As variações na altura do tubo durante os processos de enchimento e desaguamento foram obtidas com a ajuda de uma malha de 50 x 50 mm projetada nos vidros das laterais do canal. A malha quadrada de 50 mm traçada na chapa metálica (base dos tubos), permitiu verificar a variação da largura da base do tubo de geotêxtil durante o ensaio (Figura 3.6a). Além

disso, para registrar a variação da altura no processo de desaguamento foram utilizadas réguas apoiadas ao longo do comprimento do tubo com guias de leitura na parte superior do canal (Figura 3.6c).

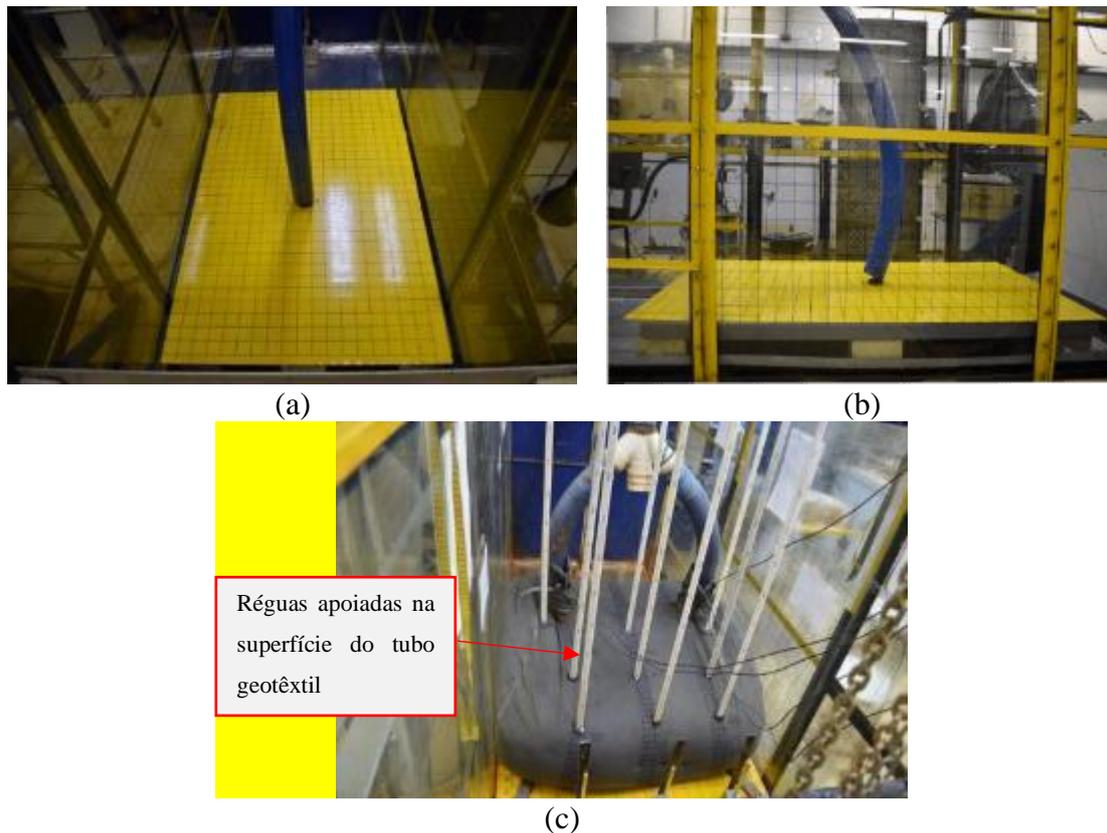


Figura 3.6 - Área de enchimento dos tubos de geotêxtil; (a) vista interna, (b) vista lateral, (c) medição da altura do tubo

Um sistema formado por um tubo de PVC acoplado a uma mangueira foi instalado na base da estrutura metálica com o objetivo de registrar a variação de altura de coluna de água dentro na base do tubo durante os ensaios. O mecanismo é composto por um flange de PVC de $\frac{1}{2}$ polegada, duas curvas de 90° de $\frac{1}{2}$ polegada, um tubo de PVC de $\frac{1}{2}$ polegada e uma mangueira transparente de 1,5 m. Deste modo, as variações do nível d'água dentro da mangueira transparente foram monitoradas e registradas. Como complemento às leituras, as variações da coluna de água foram registradas por meio de uma câmara convencional modelo GoPro Hero. A Figura 3.7 apresenta o sistema de medição da coluna de água.

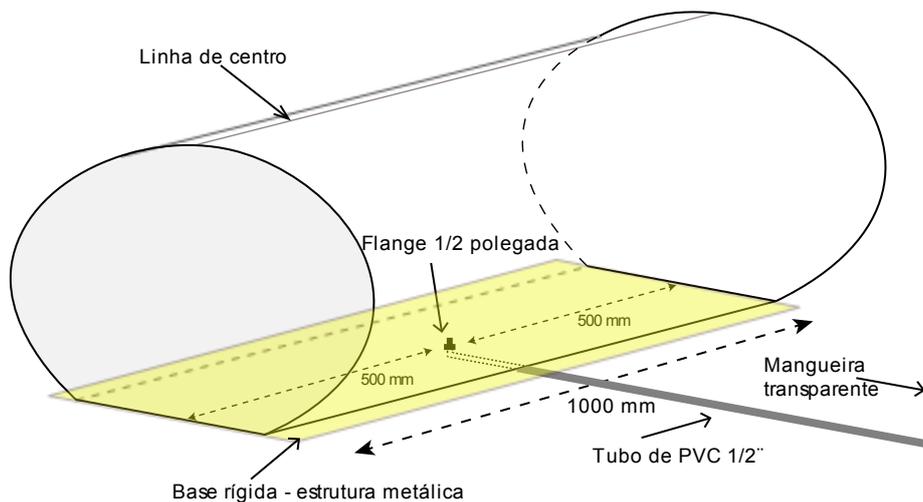


Figura 3.7 - Sistema de medição de coluna de água na base do tubo.

Assim, a Figura 3.8 apresenta uma vista geral da área selecionada dentro do canal hidráulico destinada ao enchimento dos tubos de geotêxtil.



Figura 3.8 - Vista geral da área de enchimento dos tubos de geotêxtil.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

A pesquisa foi desenvolvida utilizando como material de preenchimento um solo arenoso e um solo argiloso e tubos de geotêxtil (geotêxtil não tecido). As principais características são apresentadas a seguir.

3.2.1 MATERIAIS DE PREENCHIMENTO

O primeiro material utilizado na pesquisa foi uma areia quartzosa, de granulometria média a fina, uniforme. A sua distribuição granulométrica compreende grãos com diâmetros entre 0,075mm e 2 mm, com um tamanho médio dos grãos (D_{50}) de 0,265 mm, coeficiente de uniformidade (C_u) igual à 2,52 e coeficiente de curvatura de (C_c) de 1,7. O segundo material utilizado na pesquisa para a realização dos ensaios foi um solo silto-argiloso laterítico, com

predominância de gibsita, presença de macroporos e agregações (Burgos, 2016). A Figura 3.9 apresenta a distribuição granulométrica dos dois tipos de solo utilizado na pesquisa.

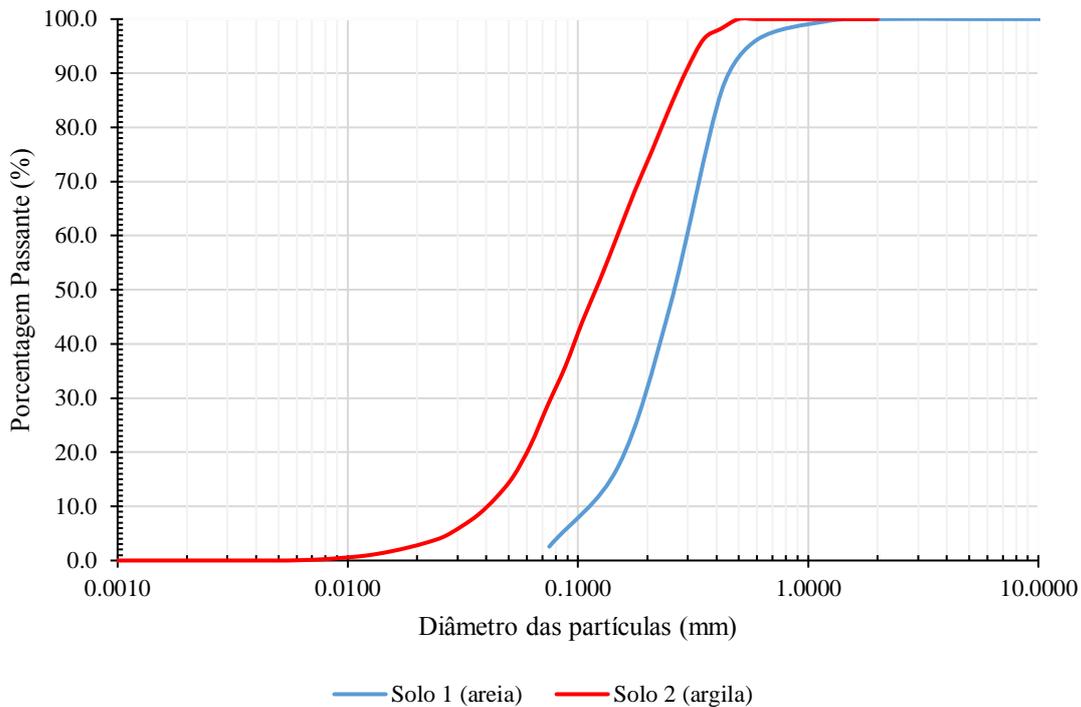


Figura 3.9 - Distribuição granulométrica dos solos 1 e 2.

3.2.2 GEOTÊXTIL

Foram utilizados 2 tipos de geotêxteis não tecidos na confecção dos tubos. Na Tabela 3.1 estão apresentadas as principais características de cada material. O primeiro geotêxtil selecionado (GNT-01) possui uma resistência à tração de 10 kN/m e abertura de filtração (Ensaio de Ponto de Bolha) de 0.130 mm e o segundo geotêxtil (GNT-02) uma resistência à tração de 9.8 kN/m e abertura de filtração igual a 0.115 mm. Na Figura 3.10 são apresentadas as propriedades dos geotêxteis não tecidos utilizados na pesquisa.

Tabela 3.1 - Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos utilizados

Nomenclatura	Polímero	M_A (g/m ²)	t_{GT} (mm)	O_{95} (mm)	J_5 (kN/m)	J_2 (kN/m)	Tmax (kN/m)	ϵ_{max} (%)
GNT-01	PET	200	2.9	0.130	10	35	10	70-80
GNT-02	PET	200	2.2	0.115	11.5	9.9	9.8	83-100

Notas: M_A = massa por unidade de área; t_{GT} = espessura nominal; O_{95} = abertura de filtração (ensaio de Ponto de Bolha); J_5 =rigidez à tração secante a 5% de deformação; J_2 = rigidez à tração secante a 2% de deformação; Tmax=resistência à tração; ϵ_{max} = deformação máxima.



(a)



(b)

Figura 3.10 - Geotêxteis utilizados na pesquisa: (a) GNT-01; (b) GNT-02.

Como parte do programa de ensaios laboratoriais foi implementado um sistema de drenagem em um dos ensaios, o qual consistiu na utilização de um tubo perfurado corrugado de 0,8 m de diâmetro com 1 m de comprimento (Figura 3.11). Desta forma, o tubo corrugado foi instalado no interior e na base do tubo de geotêxtil, sendo ele envolto com o próprio geotêxtil não tecido (GNT-02) e interligado na parte superior do tubo de geotêxtil (Figura 3.12).



(a)

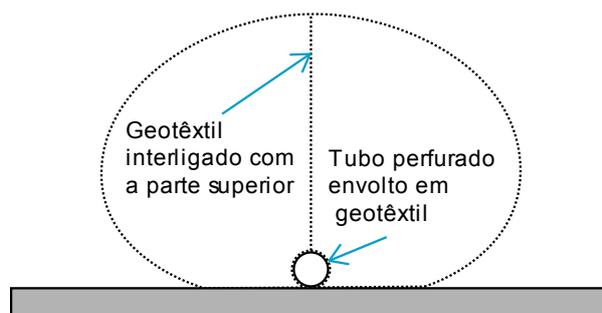


(b)

Figura 3.11 - Tubo corrugado perfurado: (a) Vista do diâmetro; (b) Vista do comprimento.



(a)



(b)

Figura 3.12 – Sistema de drenagem: (a) tubo corrugado envelopado com geotêxtil; (b) posição do sistema de drenagem dentro do tubo de geotêxtil.

Salienta-se que os ensaios desenvolvidos na presente pesquisa visaram representar o comportamento de tubos de geotêxtil de diâmetros similares ou próximos aos diâmetros utilizados em campo. Dessa forma, para os casos de obra com diâmetros maiores os ensaios devem ser considerados utilizando fatores de escala que melhor represente a situação a ser analisada.

3.3 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação desta pesquisa teve por objetivo o estudo dos comportamentos do material dentro do tubo de geotêxtil e do próprio geotêxtil. A descrição dos instrumentos utilizados é apresentada a seguir.

3.3.1 TRANSDUTOR DE PRESSÃO

Com o intuito de obter as variações nas poropressões do solo dentro dos tubos de geotêxteis foram utilizados transdutores de pressão elétricos. O modelo dos transdutores utilizado foi o SPT-102 (Figura 3.13), adquiridos da empresa Sensym Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos Ltda.



Figura 3.13 - Transdutores de pressão- Modelo SPT-102 (Fonte: Manual de instalação e operação – Semsym (2017))

A Tabela 3.2 apresenta as principais características do instrumento segundo o manual fornecido pelo fabricante.

Alimentação	de 12 a 36 Vcc
Precisão	0,5% FE
Saída de sinal	0 a 10 Vcc
Conexão ao processo (saída de rosca)	3/4
Sobre pressão	2x FE
Grau de proteção	IP65
Tipo de membrana	Aisi 316L de 0 a 25 kPa

Os transdutores de pressão precisaram de uma adaptação que permitiu eles serem utilizados dentro do tubo. Para isso, empregou-se uma mangueira de nível com uma extremidade conectada ao transdutor de pressão, aos registros e a uma ponteira preenchida com material de geotêxtil não tecido para evitar a entrada de partículas de solo na mangueira (Figura 3.14a). Com isso, o conjunto foi saturado e conectado ao dispositivo de aquisição de dados. Cabe salientar que o material de geotêxtil no interior do tubo plástico (ponteira) colocado foi saturado em água fervente antes do ensaio, para evitar a presença de bolhas (Figura 3.14b). A retirada de bolhas nas mangueiras de nível, foi realizada por meio de registros instalados ao longo do seu comprimento (Figura 3.14b).

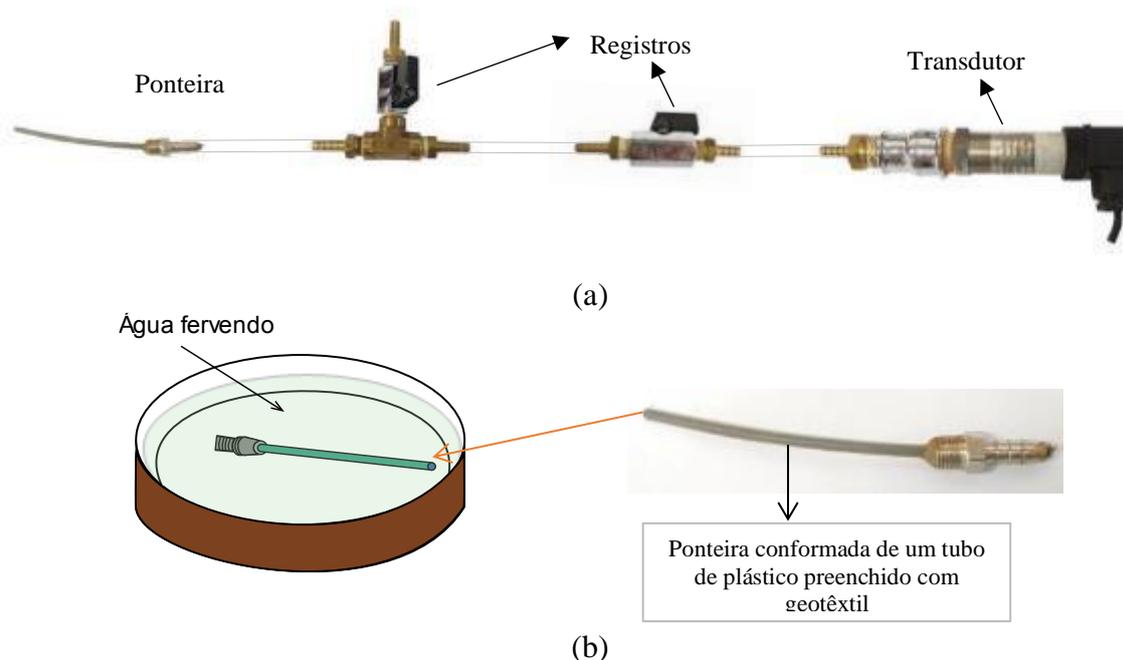


Figura 3.14 - Sistema de pedra porosa; a) sistema ligado ao transdutor de pressão, b) processo de saturação do geotêxtil

A calibração dos transdutores foi efetuada com auxílio de um equipamento controlador de pressão / volume denominado *Standard Pressure /Volume Controller*, da empresa *GDS Instruments* (Figura 3.15). Além disso, para garantir um processo de calibração satisfatório foi necessária a verificação da ausência de bolhas de ar dentro do controlador de pressão / volume.

Na Figura 3.15 é apresentado o equipamento utilizado no processo de calibração dos transdutores de pressão.



Figura 3.15 - Equipamento utilizado na calibração dos transdutores de pressão.

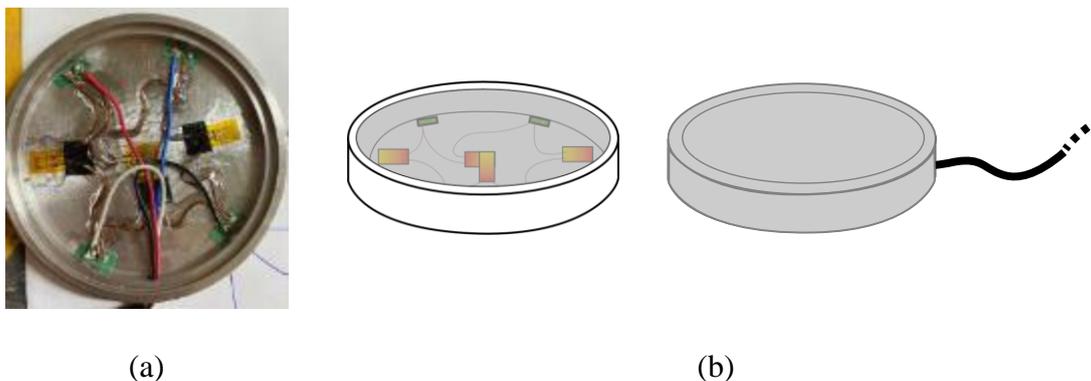
3.3.2 CÉLULAS DE TENSÃO TOTAL

As tensões verticais na base e no interior do tubo de geotêxtil foram registradas por meio de células elétricas de tensão total. As células utilizadas foram fabricadas pela empresa Micro Sensores Industrial, Modelo CTT-1-2KS, do tipo diafragma, com um diâmetro de 50 mm e uma espessura de 6mm e uma capacidade máxima de medição de 200 kPa (Figura 3.16). Além disso, células com capacidade máxima de 600 kPa também foram utilizadas, com 70 mm de diâmetro e 7mm de espessura.



Figura 3.16 - Célula de tensão total utilizada na pesquisa.

Como o contato entre a célula de tensão e o material de enchimento do tubo geotêxtil implica no contato com água, foi necessário realizar um procedimento de vedação tanto no interior (resina de silicone) quanto no exterior da célula (silicone), para evitar que a umidade pudesse danificá-la, como mostrado na Figura 3.17.



(a) (b)
 Figura 3.17 - Processo de vedação das células de tensão total – (a) proteção das conexões e *strain gauge*; (b) vedação interna e externa.

As células de tensão total utilizadas nesta pesquisa foram calibradas por meio de equipamento disponível no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. O equipamento é constituído por uma caixa de aço com dimensões de 300 mm x 300 mm x 300 mm, uma tampa com uma bolsa de borracha instalada na sua parte inferior e um sistema ar-água (Figura 3.18). O processo de calibração foi realizado posicionando as células de tensão na base da caixa sendo preenchida com lama. A aplicação de tensões normais foi realizada por meio da bolsa de borracha pressurizada com água.



Figura 3.18 - Equipamento de calibração das CTT.

3.3.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição dos sinais dos instrumentos utilizados nesta pesquisa foi feita com o uso do aquisitor da marca LYNX, modelo ADS 2000, que utiliza o *software* AqDados 7.02 para o processamento dos dados (Figura 3.19). O sistema possui 32 canais, onde os instrumentos foram ligados e configurados conforme o manual fornecido pelo fabricante.



Figura 3.19 - Sistema LYNX, modelo ADS 2000

3.3.4 EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS DE PALHETA (*VANE TEST*)

Após o processo de desaguamento dos ensaios com tubos de geotêxtil foram utilizados dois equipamentos para ensaios de palheta (*Vane Shear Test*) para a avaliação da resistência não drenada (S_u) do material retido dentro do tubo (Figura 3.20) nos ensaios com material fino de enchimento.

O primeiro equipamento utilizado consistiu em uma palheta de 12,7 mm de diâmetro por 25,4 mm de altura adaptada a um sistema conformado de um controlador de motor de passo (modelo ARD-AD), um motor de passo (modelo ARM46AC-T10) e um sistema de aquisição das leituras (modelo Shimpo FG-7002), os ensaios foram executados conforme a norma ASTM D4648/D4648M-16. O segundo equipamento utilizado pertence à empresa DERDF, e trata-se de um equipamento de palheta para ensaios de campo (NBR 10905-MB-3122) conformada de uma palheta cruciforme com dimensões de 65 mm de diâmetro x 130 mm de comprimento. As suas principais características são apresentadas na Tabela 3.3.



Figura 3.20 - Equipamento do ensaio de palheta

Tabela 3.3 - Especificações do equipamento para ensaios de palheta

Características	Descrição
Dimensões do torquímetro	270 mm (altura) x 230 mm (largura) x 210 mm (profundidade)
Peso do torquímetro	25 kg
Acionamento	Manual, por manivela
Anel dinamométrico	Carregamento até 5000 N
Relógio comparador	0 a 5 mm / 0,001 mm
Palheta cruciforme	65 mm de diâmetro x 130 mm comprimento

3.4 SEQUÊNCIA GERAL DAS ATIVIDADES

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada nos ensaios de laboratório. Na Figura 3.21 apresenta-se um resumo do procedimento desenvolvido para cada ensaio proposto nesta pesquisa. De uma forma geral, o processo consistiu na deposição dos materiais (solo arenoso/solo argiloso e água) no reservatório de mistura. Assim a partir da finalização do processo de mistura procedeu-se ao enchimento do tubo. A Figura 3.21 mostra a sequência de atividades desta etapa da pesquisa.

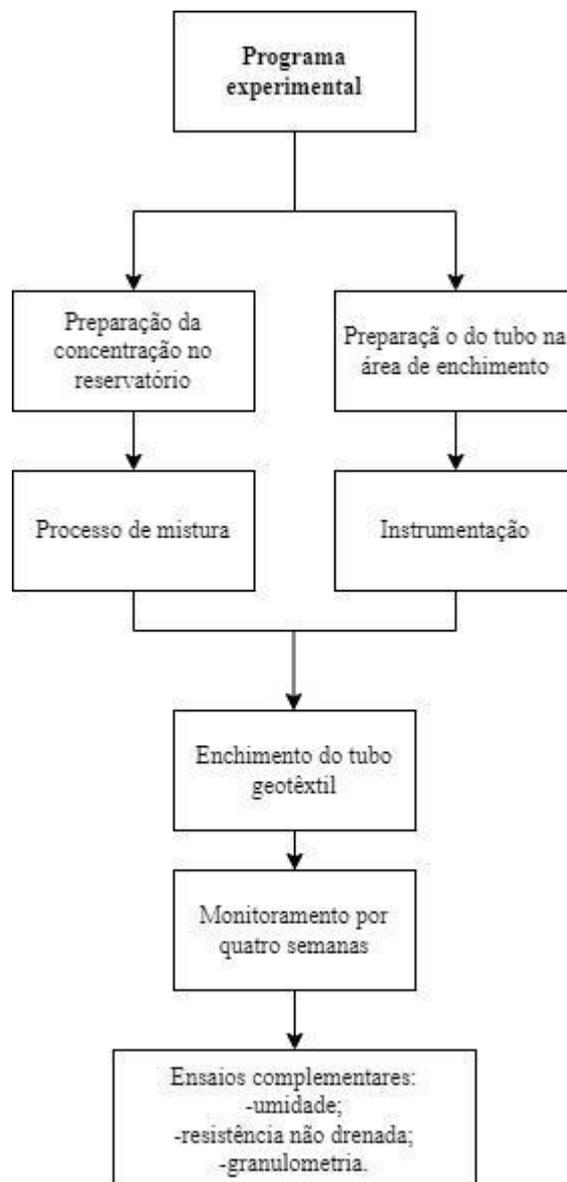


Figura 3.21 - Procedimento de ensaio

Após o enchimento, foi estudado o processo de desaguoamento, variações nas tensões verticais, poropressões geradas pelo material retido bem como as variações na geometria do tubo e deformações no geotêxtil.

3.5 INSTALAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

Para o monitoramento das tensões verticais, assim como das poropressões, foi necessário definir pontos de medição. Nesse sentido, as tensões verticais foram medidas por meio de 3 pontos localizados na linha do centro do tubo e identificados como P1TV, P2TV e P3TV (Figura 3.22). Do mesmo modo, foram definidos três pontos de monitoramento para as poropressões, sendo elas identificadas como P1P, P2P e P3P (Figura 3.23).

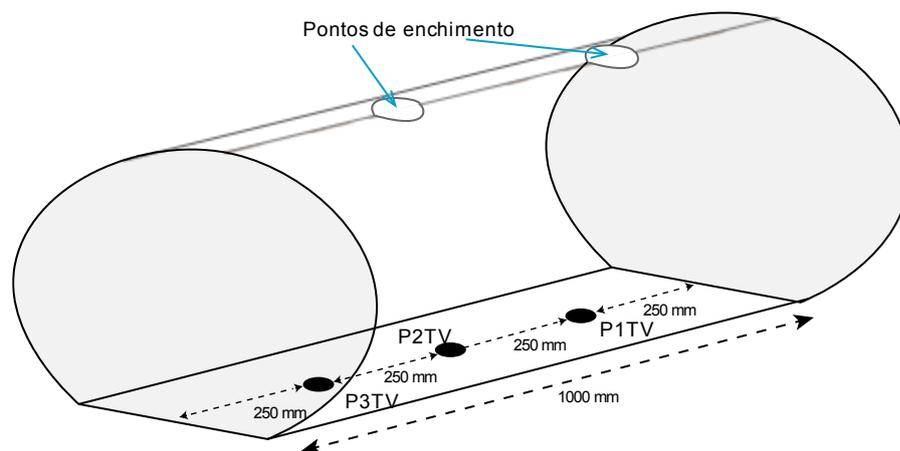


Figura 3.22 - Localização das células de tensão total

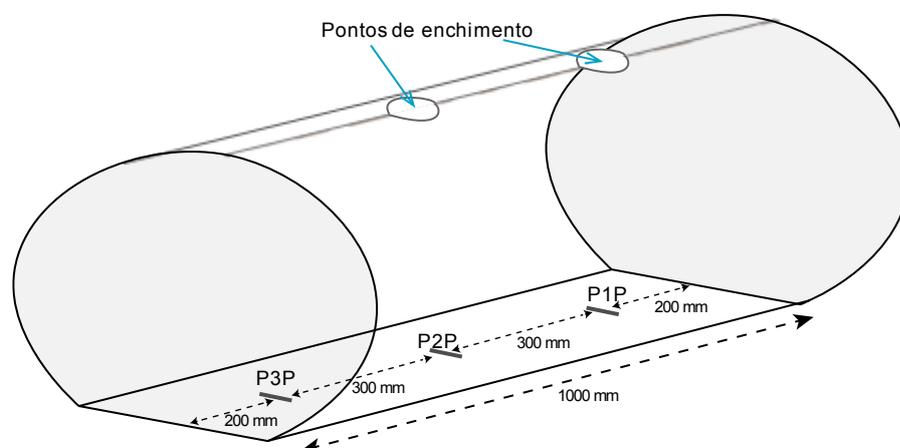


Figura 3.23 - Localização dos transdutores de pressão

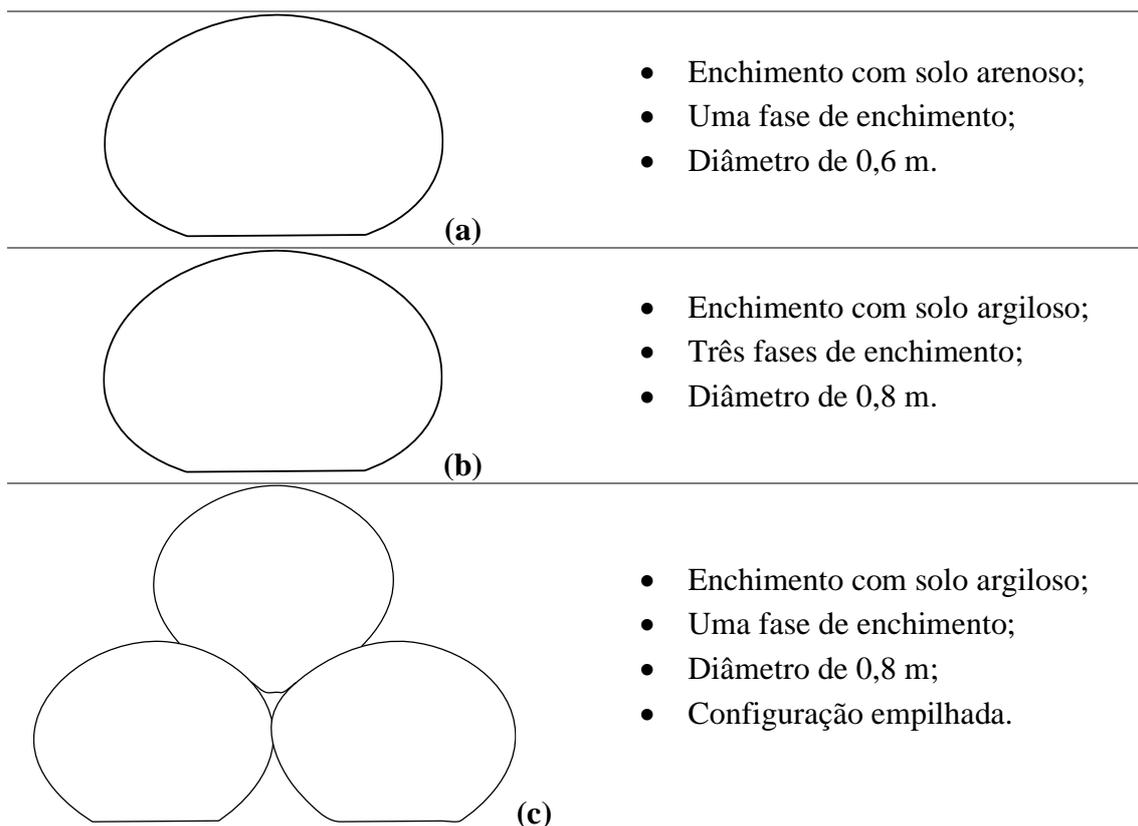
Como comentado anteriormente, neste estudo foram utilizados dois tipos de materiais de enchimento, solo arenoso e solo argiloso, bem como dois tipos de geotêxteis não tecidos

para a confecção dos tubos (GNT-01 e GNT-02). A utilização do solo arenoso permitiu verificar o funcionamento do equipamento em termos de concentração de sólidos e vazão de enchimento, por meio do controle dos registros instalados no sistema de recirculação. Além disso, também permitiu verificar a definição e distribuição da instrumentação tanto dentro quanto fora do tubo.

3.6 DEFINIÇÃO DOS ENCHIMENTOS

Foram definidos vários tipos de enchimento visando avaliar o comportamento do material de preenchimento e do geotêxtil. Dessa forma, a Figura 3.24 apresenta um resumo dos ensaios desenvolvidos. Os primeiros enchimentos foram desenvolvidos utilizando solo arenoso para tubos com 0,6 m de diâmetro (Figura 3.24a). Posteriormente, foi modificado o diâmetro dos tubos para 0,8 m (b), bem como o material de enchimento para um solo argiloso. Nessa etapa, o ensaio foi executado utilizando três fases de enchimento para uma concentração de sólidos próxima a 50%, calculada pela equação proposta por Lawson (2008) no item 3.7 (Figura 3.24b).

Um empilhamento de tubos foi realizado na etapa seguinte da pesquisa, seguindo uma configuração de dois tubos na base e um no topo com uma fase de enchimento (Figura 3.24c) para cada tubo. Por último, dois tubos na condição isolada com uma fase de enchimento foram executados, sendo um deles com sistema de drenagem instalado no seu interior (Figura 3.24e).



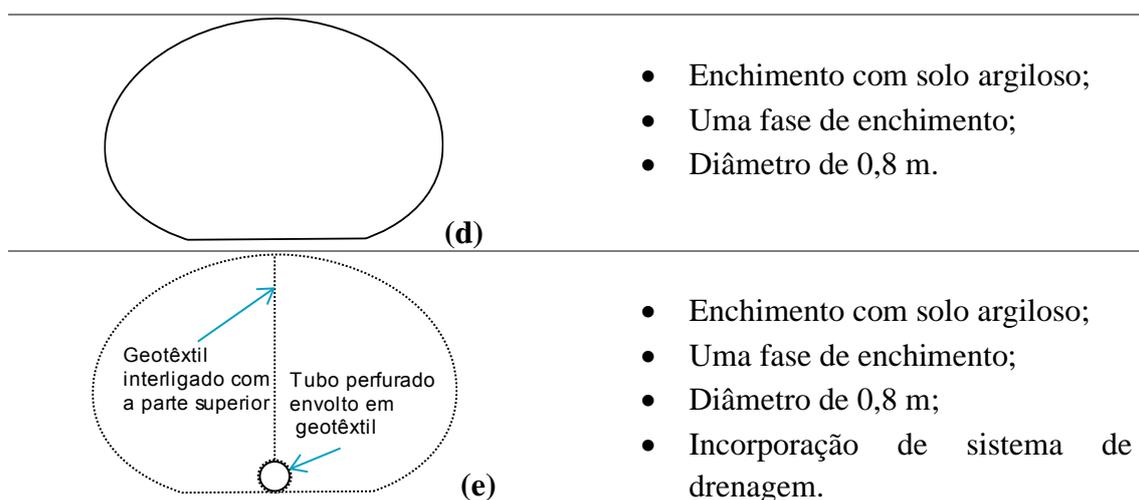


Figura 3.24 - Tipos de ensaios desenvolvidos na pesquisa

Na Tabela 3.4 apresenta-se o resumo do programa experimental executado.

Tabela 3.4 - Ensaios realizados

Tipo de ensaio	Tipo de geotêxtil	Material de preenchimento	Código do ensaio
Isolado	GNT-01	Areia	¹ TGA-01
Isolado	GNT-01	Areia	TGA-02
Isolado	GNT-01	Areia	TGA-03
Isolado	GNT-02	Argila	² TG-3FE
Empilhado	GNT-02	Argila	³ TGE-01/TGE-02/TGE-03
Isolado	GNT-02	Argila	⁴ TG-CD
Isolado	GNT-02	Argila	⁵ TG-SD

Nota: ¹TGA= tubo de geotêxtil com solo arenoso, ²TG-3FE= tubo de geotêxtil com três fases de enchimento com solo argiloso, ³TGE= tubo de geotêxtil empilhado como solo argiloso, ⁴TG-CD= tubo de geotêxtil com sistema de drenagem com solo argiloso, ⁵TG-SD= tubo de geotêxtil sem sistema de drenagem com solo argiloso.

3.7 CONCENTRAÇÃO DO MATERIAL DE PREENCHIMENTO

Para se obter a concentração desejada da lama de enchimento utilizou-se a equação proposta por Lawson (2008), definida como:

$$S = \frac{1}{1 + w} \quad (4.1)$$

Onde, S é a concentração de sólidos em peso da lama, e w é o teor de água da lama.

Os ensaios com solo arenoso foram realizados com uma concentração de sólidos de 35-40% e nos ensaios utilizando solo argiloso foi atingida uma concentração próxima de 50%.

A extração das amostras da mistura de líquidos-sólidos foi necessária para conferir os valores de concentração. Observou-se que o tempo de mistura entre 5 – 7 minutos foi suficiente para garantir a homogeneização da lama.

3.8 PREPARAÇÃO DOS TUBOS DE GEOTÊXTIL

Os geotêxteis não tecidos, GNT-01 e GNT-02, foram utilizados na confecção dos tubos de geotêxteis para diâmetros de 0,6 m e 0,8 m, respectivamente, utilizando uma máquina de costura portátil e de bancada. Assim, a costura do tipo reta foi utilizada e avaliada por meio de ensaios de tração em faixa larga de acordo com a norma NBR ISO 10319, tendo sido ensaiados seis corpos de prova de 0,2 m x 0,1 m. Na Figura 3.25 é apresentado o processo de costura. A máquina de costura de bancada foi empregada na confecção interna do TG-CD no qual instalado de um sistema de drenagem (item 3.2.2). O restante dos tubos foram confeccionados com a máquina de costura portátil.



a)



b)

Figura 3.25 - Confeção dos tubos de geotêxtil. a) Com máquina portátil; b) com máquina de bancada.

3.9 EXECUÇÃO DOS ENCHIMENTOS

3.9.1 ENCHIMENTO DO TUBO DE GEOTÊXTIL COM SOLO ARENOSO

Antes do processo de enchimento em todos os ensaios foi realizada a lubrificação das faces internas do canal que ficavam em contato com as bordas do tubo de geotêxtil. Para isso, as paredes foram revestidas com dupla camada de vaselina e filme plástico com o objetivo de reduzir o atrito entre as paredes e o geotêxtil. Esse procedimento foi repetido na execução de cada ensaio.

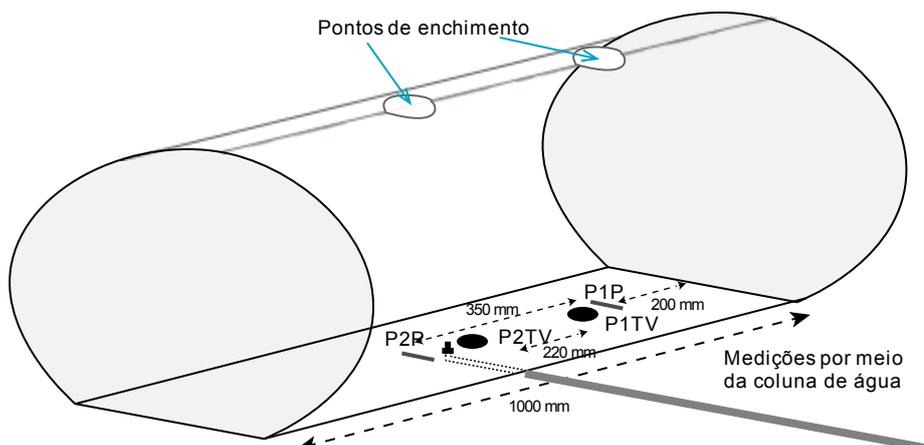
O procedimento utilizado nessa etapa permitiu corrigir e definir algumas etapas relacionadas com o enchimento, tais como os pontos de entrada do material e a vazão de

enchimento. O primeiro ensaio possibilitou verificar o funcionamento do equipamento, bem como a realização de ajustes e definição do processo de enchimento para os ensaios seguintes.

Como resultado, foram definidos dois pontos de entrada no processo de enchimento com o intuito de obter uma melhor distribuição do material dentro do tubo. O segundo e o terceiro ensaio com solo arenoso foram executados introduzindo duas células de tensão e transdutores de pressão distribuídos conforme apresentado na Figura 3.26.



(a)



(b)

Figura 3.26 - Instrumentação utilizada no ensaio com solo arenoso.

Nestes ensaios, a variação da poropressão na base do tubo também foi verificada por meio do sistema de coluna de água (Figura 3.26). Com isso, a confiabilidade dos resultados obtidos pelos transdutores de pressão foi aferida com os valores registrados pela coluna de água.

3.9.2 ENCHIMENTO DO TUBO DE GEOTÊXTIL ISOLADO COM SOLO ARGILOSO

A recalibração do sistema de mistura foi necessária nessa fase, pois a mudança do material de enchimento requereu ajustar a configuração dos registros a fim de atingir a concentração e vazão da nova mistura (solo argiloso e água). Além disso, o diâmetro do tubo de geotêxtil foi aumentado para 800 mm, assim como foi mudado o tipo de material de geotêxtil não tecido (GNT-02) que teve como objetivo verificar a capacidade de desaguamento e a deformação.

As etapas de enchimento foram aumentadas em mais duas fases de preenchimento, sendo utilizado células de tensão e transdutores de pressão na linha de centro da base do tubo, conforme apresentado na Figura 3.27.

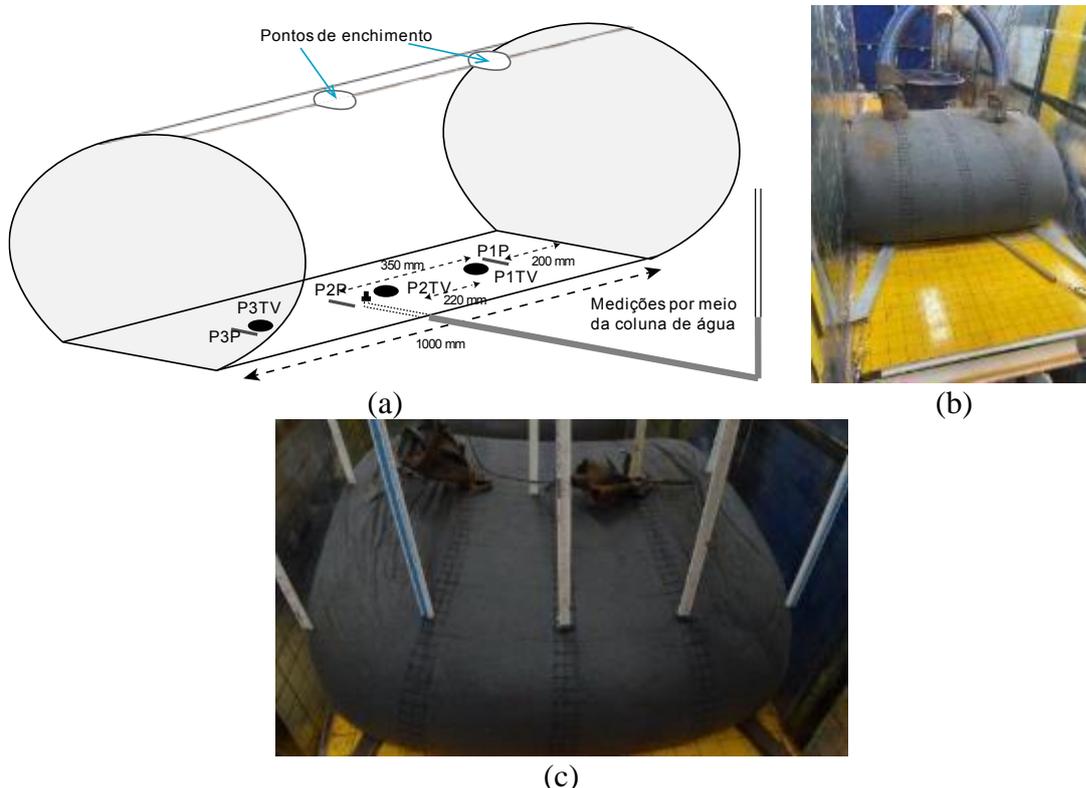


Figura 3.27 - Instrumentação para o ensaio com solo argiloso: (a) Células de tensão total, transdutores de pressão e coluna de água; (b) Após a primeira fase de enchimento; (c) Medição da altura.

A variação de altura do tubo foi registrada diariamente, bem como a quantidade de água drenada até o final do ensaio. Uma vez finalizado o ensaio, foram retiradas amostras superficiais na linha de centro do tubo para a obtenção da umidade.

3.9.3 ENCHIMENTO DE TUBOS DE GEOTÊXTIL EMPILHADOS COM SOLO ARGILOSO

Três tubos de geotêxtil foram utilizados na configuração empilhada, para o qual o processo de enchimento foi conduzido com uma única fase de enchimento (Figura 3.28). Nesse caso, a instrumentação utilizada nos dois tubos na base do empilhamento consistiu em dois transdutores de pressão e três células de tensão (Figura 3.29a). O tubo de cima foi monitorado com duas células de tensão e dois transdutores de pressão distribuídos conforme apresentados na Figura 3.29b.

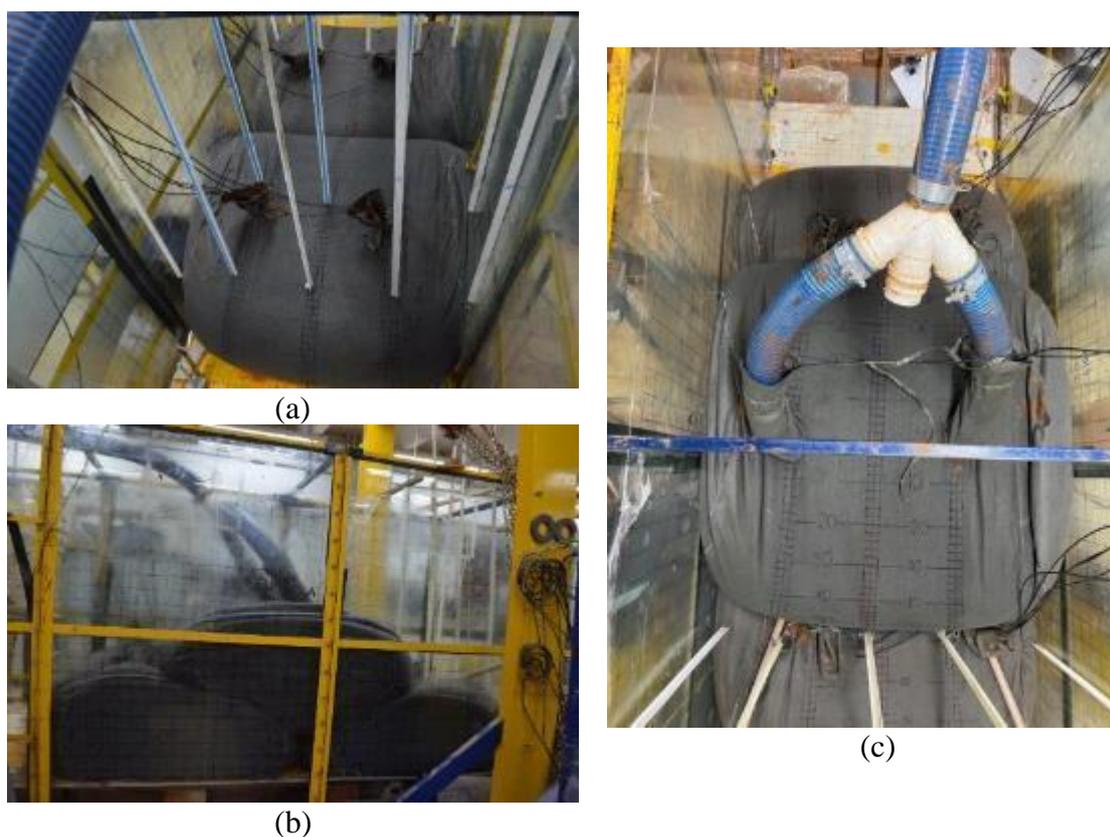


Figura 3.28 - Processo de enchimento dos tubos em configuração empilhada.

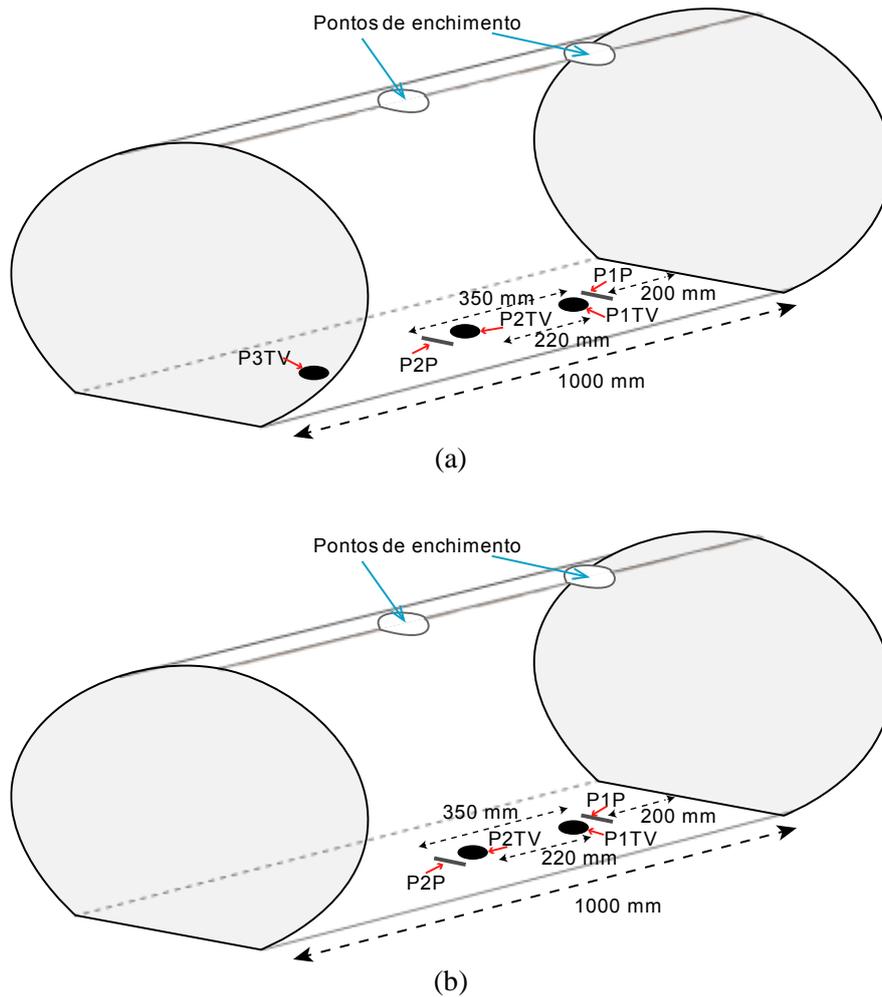
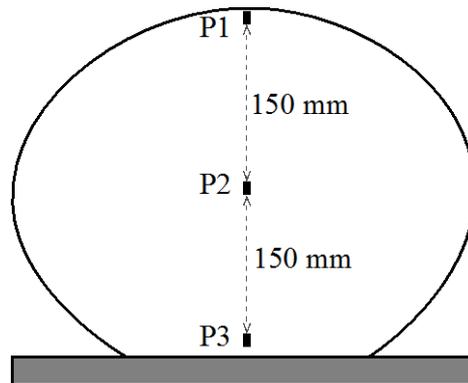


Figura 3.29 - Instrumentação na configuração empilhada: (a) tubos localizados na base; (b) tubo localizado no topo.

No final do ensaio, amostras superficiais (Figura 3.30a) foram coletadas para verificar a umidade no final do ensaio. Também amostras cilíndricas de 101,6 mm de diâmetro por 100 mm de altura e na linha de centro foram coletadas para a execução de ensaios de palheta em diferentes profundidades (Figura 3.30b), utilizando a palheta de 12,7 mm de diâmetro.



(a)



(b)

Figura 3.30 - Verificação da umidade no final do ensaio: (a) amostras superficiais; (b) amostras na linha de centro com diferentes profundidades.

3.9.4 ENCHIMENTO DE TUBO DE GEOTÊXTIL COM SOLO ARGILOSO COM E SEM SISTEMA DE DRENAGEM INTERNO

Dois tubos de geotêxteis foram preenchidos utilizando uma única fase de enchimento, sendo um deles com a incorporação do sistema de drenagem (TG-CD). A disposição dos transdutores de pressão e células de tensão foi feita próximo à linha de centro do tubo para evitar interferência nos resultados registrados durante o ensaio, assim, foi adotado uma distância de 80mm (Figura 3.31). Por outro lado, a distribuição das células de tensão e transdutores de pressão do ensaio TG-SD (sem o sistema de drenagem) foi realizado conforme a Figura 3.22 e Figura 3.23.

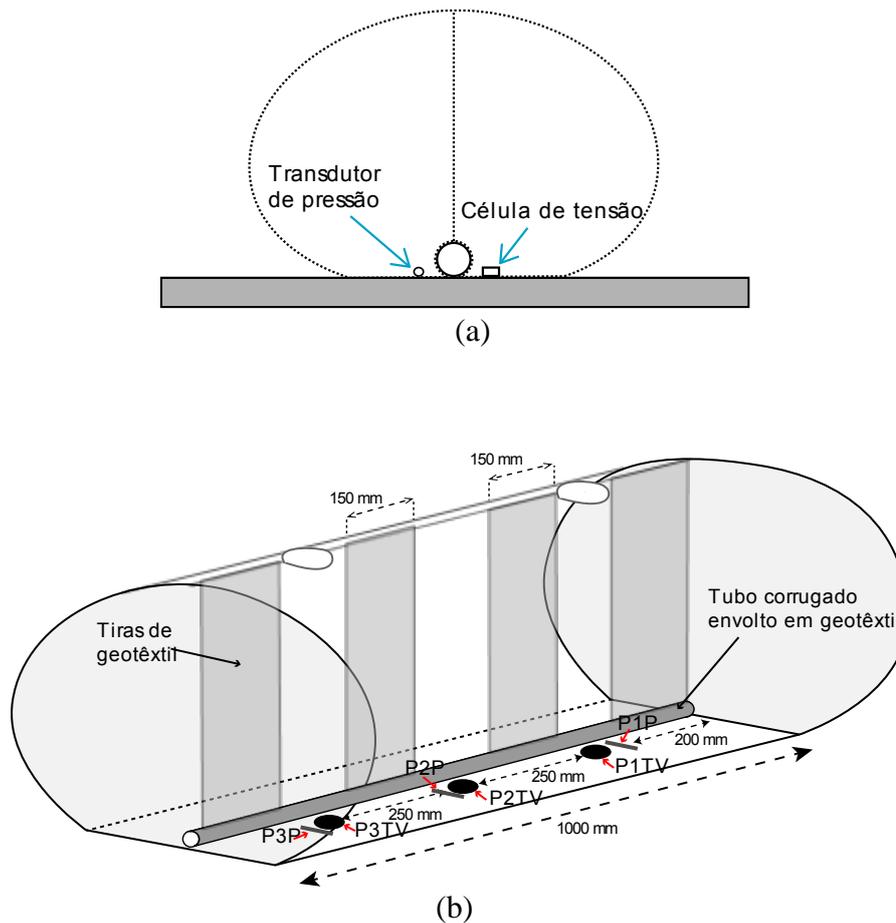


Figura 3.31 - Montagem do tubo corrugado perfurado no interior do tubo de geotêxtil – (a) localização das células de tensão e transdutores de pressão; (b) montagem do tubo corrugado perfurado.

Uma vez finalizado o ensaio e com o auxílio do equipamento de ensaio de palheta de campo foram realizados ensaios para a obtenção da resistência não drenada (S_u) na parte mais superficial do tubo e próximo da base seguindo a linha de centro (Figura 3.32).



Figura 3.32 - Ensaio complementar com equipamento *vane test*.

3.10 MEDIÇÃO DO VOLUME DE ÁGUA NO PROCESSO DE DESAGUAMENTO

O monitoramento do processo de desagüamento ocorreu após o enchimento dos tubos. Assim, a água drenada foi coletada por meio de canaletas instaladas nas bordas da base de aço de sustentação dos tubos interligadas a recipientes de acumulação. A Figura 3.33 mostra a captação da água durante o ensaio.



Figura 3.33 - Captação de água durante o ensaio.

4 ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos da instrumentação empregada nesta pesquisa, assim como dos ensaios complementares, são apresentados neste capítulo. A Tabela 4.1 indica os resultados obtidos em cada ensaio.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos nos ensaios

Montagem dos Ensaios	Resultados							
	Deformação	Tensão Vertical	Poropressão	Geometria do TG	Coluna de água	Desaguamento	Resistência não drenada	Granulometria Laser
TGA ¹ -01 areia- diâmetro 600mm	√	-	-	-	-	-	-	-
TGA-02 areia- diâmetro 600mm	√	√	√	√	√	-	-	-
TGA-03 areia- diâmetro 600mm	√	√	√	√	√	-	-	-
TG-3FE ² argila- diâmetro 800mm	√	√	√	√	-	√	-	√
TGE ³ -01 argila- diâmetro 800mm	√	√	√	√	√	√	√	√
TGE-02 argila- diâmetro 800mm	√	√	√	√	√	√	√	√
TGE-03 argila- diâmetro 800mm	√	√	√	√	√	√	√	√
TG-CD ⁴ argila- diâmetro 800mm	√	√	√	√	-	√	√	√
TG-SD ⁵ argila- diâmetro 800mm	√	√	√	√	-	√	√	√

Nota: TGA¹= tubo de geotêxtil com solo arenoso, TG-3FE²= tubo de geotêxtil com três fases de enchimento, TGE³= tubo de geotêxtil empilhado, TG-CD⁴= tubo de geotêxtil com sistema de drenagem, TG-SD⁵= tubo de geotêxtil sem sistema de drenagem.

4.1 ENCHIMENTO DE TUBOS GEOTÊXTEIS COM SOLO ARENOSO

Inicialmente, apresentam-se os resultados obtidos dos tubos preenchidos com areia TGA-02 e TGA-03. Cabe mencionar que o ensaio TGA-01 foi realizado como parte da calibração do sistema de bombeamento, assim, os resultados obtidos nesse ensaio consistiram na verificação da vazão bem como a concentração de sólidos.

4.1.1 POROPRESSÕES E TENSÕES TOTAIS

A Figura 4.1 mostra as poropressões medidas no ensaio TGA-02. Assim, resultados máximos foram obtidos durante o processo de enchimento. Os valores máximos apresentados são devidos ao jato da mistura entrando no tubo. Além disso, pode ser observada a rápida

diminuição das poropressões durante o enchimento, o que evidencia a saída da água livre do sistema bem como a capacidade drenante do geotêxtil em um intervalo de tempo inferior a 12 horas.

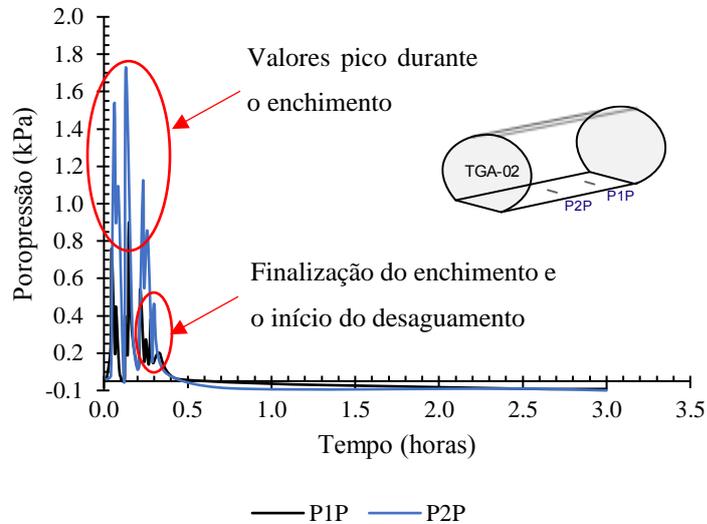


Figura 4.1 - Poropressão medida no ensaio TGA-02

O monitoramento da variação das poropressões no ensaio TGA-03 apresenta-se na Figura 4.2. Percebe-se o valor máximo de 1,66 kPa para a poropressão durante o enchimento, no entanto, este valor rapidamente diminuiu em consequência da saída da água livre gerada pela rápida formação de camadas de partículas sólidas no fundo do tubo. Similarmente ao ensaio TGA-02, as poropressões rapidamente diminuiram após o final do enchimento.

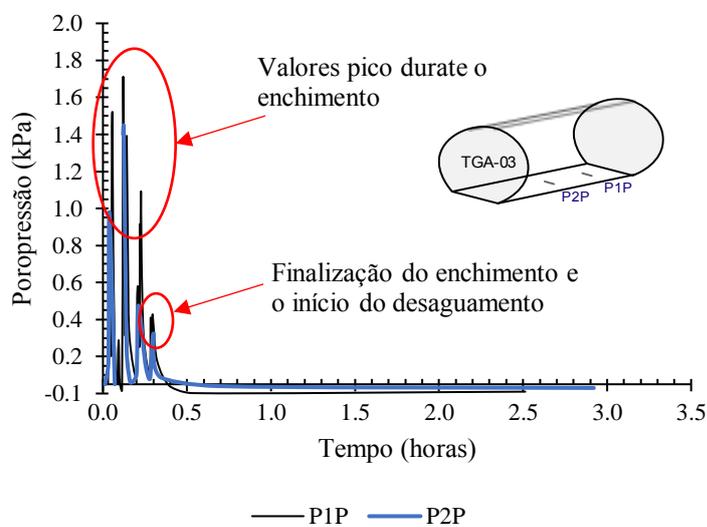


Figura 4.2 - Poropressão medida no ensaio TGA-03

Os valores obtidos pelos transdutores de pressão foram aferidos com os valores obtidos pelo sistema de coluna de água. Na Figura 4.3 mostra-se a comparação entre os resultados obtidos com ambos os métodos. Pode-se observar uma semelhança na resposta dos dois sistemas, com uma diferença nos valores máximos, devido ao menor tempo de resposta dos transdutores. Deve-se atentar que parte dessa diferença pode estar relacionada ao impacto do jato da mistura no transdutor por conta da utilização de uma única entrada central para o enchimento.

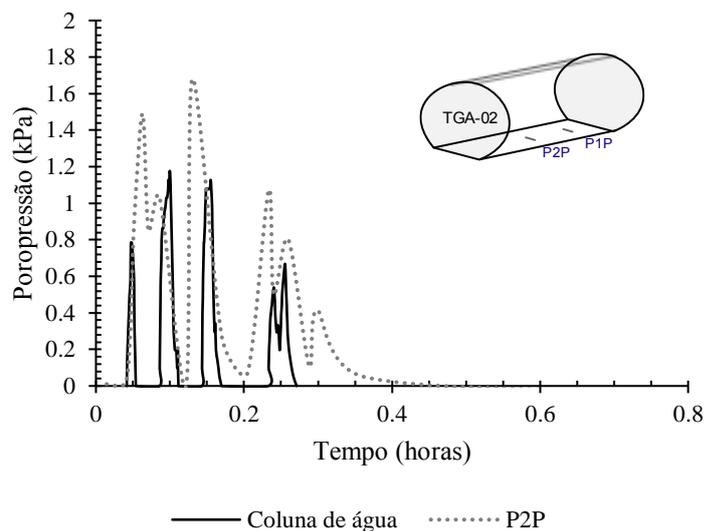


Figura 4.3 – Comparação das poropressões empregando o transdutor de pressão e medição pela coluna de água no ensaio TGA-02

A Figura 4.4 mostra os resultados obtidos para as poropressões no ensaio TGA-03. Neste ensaio, a entrada da mistura (areia-água) foi realizada em dois pontos de acesso, pois percebe-se que dessa forma era adquirida uma maior uniformidade no processo de enchimento. Assim, com esses dois acessos reduziram-se os valores máximos de poropressões registrados por conta da ação do impacto do jato.

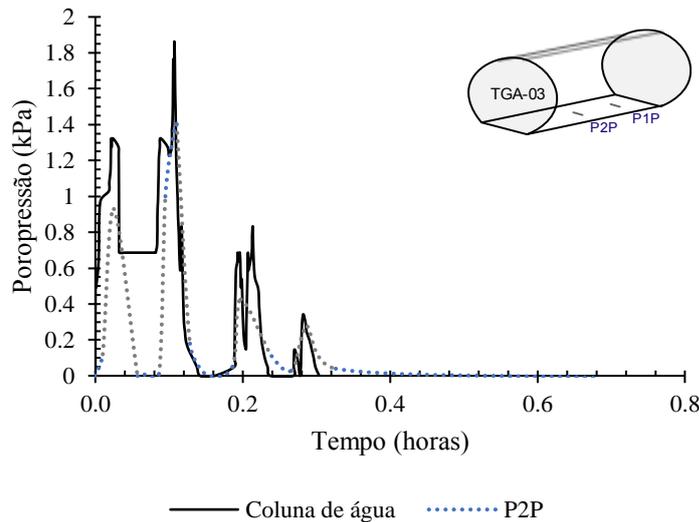


Figura 4.4 - Comparação das poropressões empregando o transdutor de pressão e medição pela coluna de água no ensaio TGA-03

A verificação das tensões verticais no interior do tubo foi obtida no ensaio TGA-02 (Figura 4.5). Para cada ponto de monitoramento pode ser observada uma rápida estabilização das tensões dentro do tubo, principalmente após o final do processo de enchimento, decorrente da alta permeabilidade do solo arenoso. Por outro lado, percebe-se uma diferença das tensões captadas nos dois pontos de medição, resultando em uma maior deposição de material no ponto de medição 02 (P2TV), na metade do tubo. Cabe mencionar que o processo de enchimento do TGA-02 foi desenvolvido utilizando um único ponto de enchimento (metade do tubo) motivo pelo qual uma maior quantidade de material foi acumulada nesse ponto, além de uma possível influência do impacto do jato de mistura nas fases iniciais de enchimento.

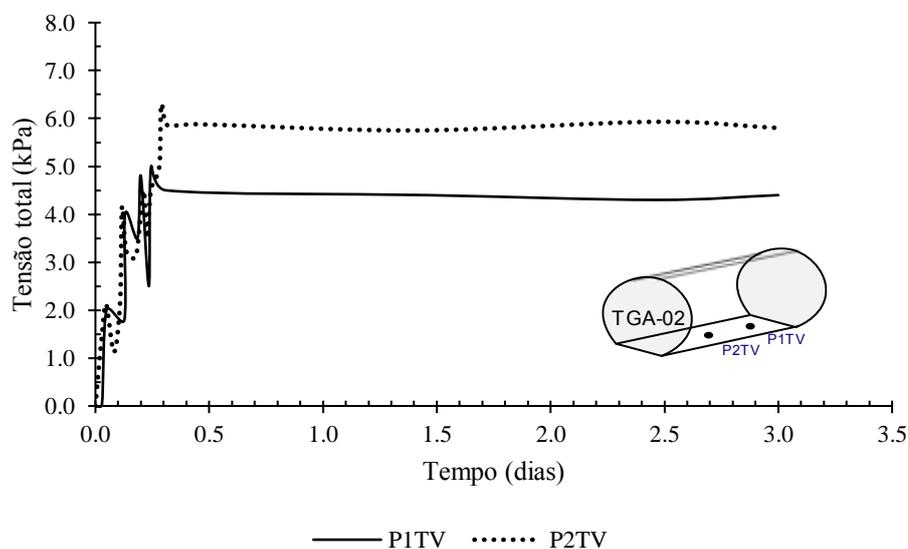


Figura 4.5 - Tensão total medida no ensaio TGA-02

As variações nas tensões totais também foram obtidas no ensaio TGA-03 (Figura 4.6). Pode ser observado uma rápida estabilização, assim como aconteceu no ensaio TGA-02. No entanto, o valor registrado no ponto P1TV é maior que o P2TV. Isso mostra alguma influência do impacto do jato da mistura durante o enchimento bem como maior quantidade de material drenado acumulado nessa posição, pois nesse ensaio foram utilizados dois pontos de enchimento.

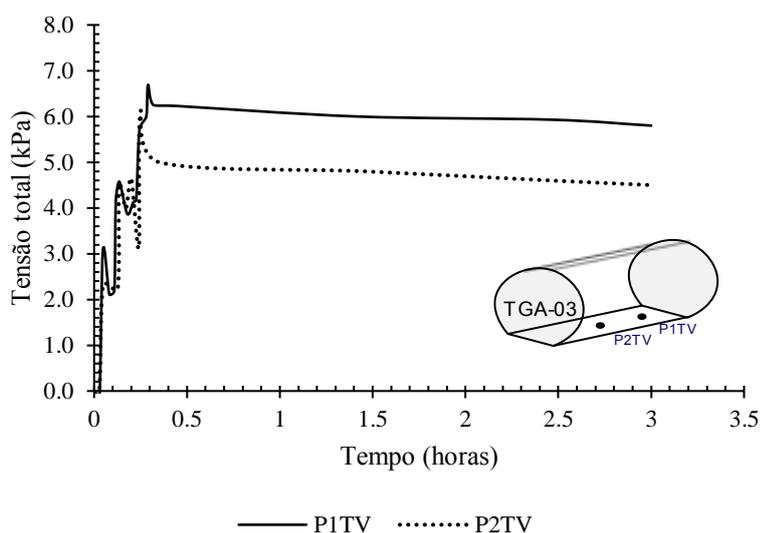


Figura 4.6 - Tensão total medida no ensaio TGA-03

4.1.2 DEFORMAÇÃO NO GEOTÊXTIL

Na Figura 4.7 apresenta-se a variação da deformação no geotêxtil ao longo do perímetro do tubo no final do enchimento dos ensaios TGA-02 e TGA-03. Percebe-se uma maior deformação nas seções I e II, próximas da coroa do tubo, diminuindo em direção à base do tubo. Assim, ao utilizar como referência a seção I, nota-se maior diferença obtida no ensaio TGA-02 com 25% de deformação contra 14% registrado do ensaio TGA-03. Assim, a diferença obtida entre os dois ensaios pode ser devido a uma maior eficiência no processo de enchimento do tubo ao serem utilizadas duas entradas para a mistura.

Constatou-se que, ao final do processo de enchimento, havia uma maior acumulação de material na seção central do tubo no ensaio TGA-02 por esse ter um único ponto de entrada da mistura. Por outro lado, uma melhor distribuição no final do enchimento foi atingida no ensaio TGA-03, onde utilizaram-se dois pontos de entrada. Para o final do ensaio TGA-02 a

deformação máxima registrada na faixa I foi de 22% e para o ensaio TGA-03 foi de 12,5% (Figura 4.8).

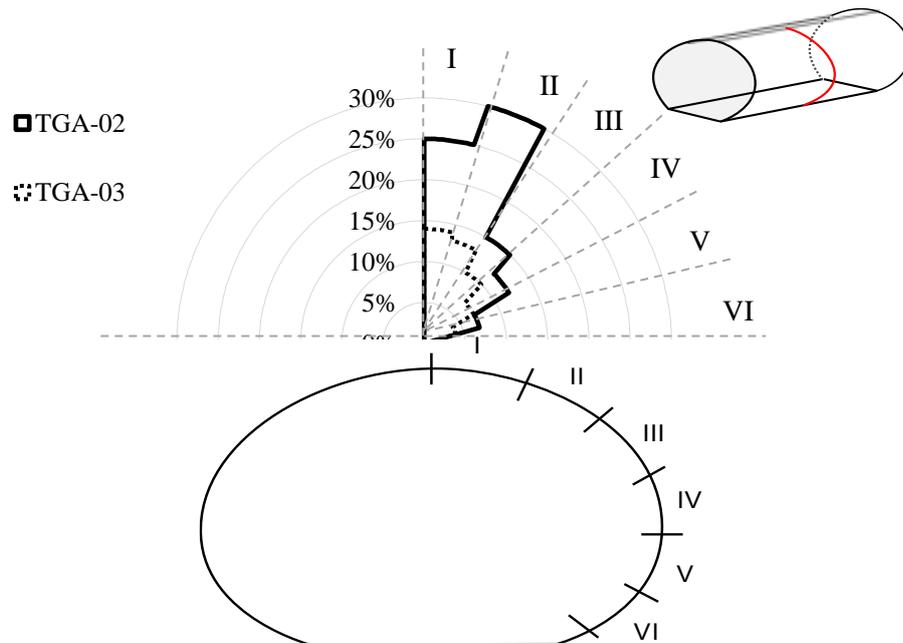


Figura 4.7 - Deformações no geotêxtil nos ensaios TGA-02 e TGA-03 após enchimento

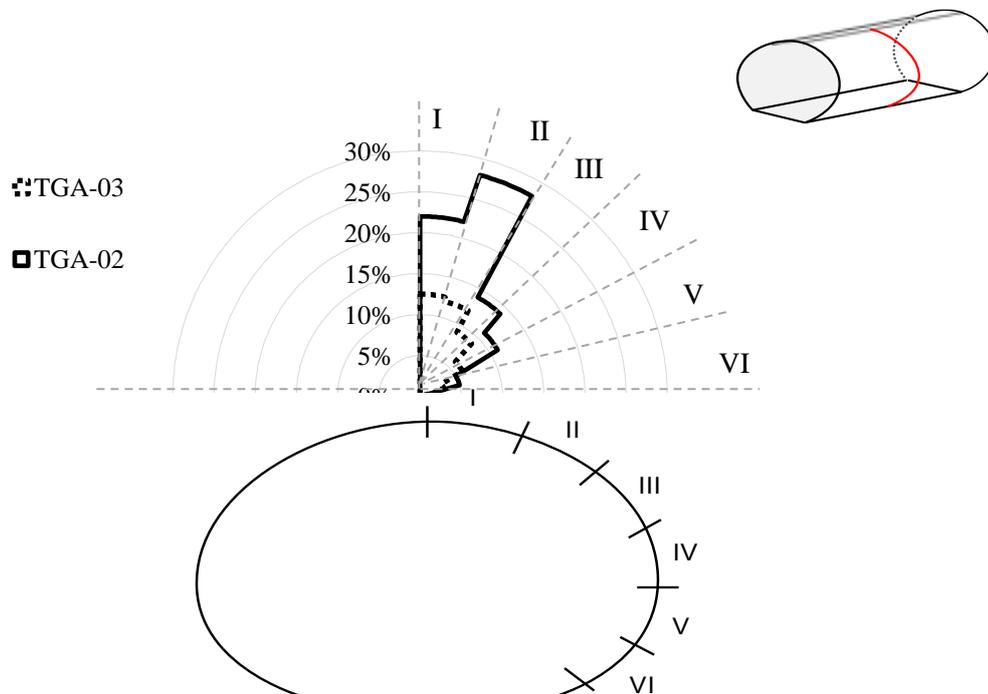


Figura 4.8 – Deformações no geotêxtil nos ensaios TGA-02 e TGA-03 no final do ensaio

4.2 ENSAIOS COM TUBOS PREENCHIDOS COM SOLO ARGILOSO

4.2.1 INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE ENCHIMENTO NO COMPORTAMENTO DOS TUBOS GEOTÊXTEIS

Os resultados obtidos dos ensaios TG-SD e TG-3FE foram utilizados no estudo da influência do processo de enchimento. Cabe lembrar que uma única etapa de enchimento foi utilizada no ensaio TG-SD e três etapas foram empregadas no ensaio TG-3FE. Dessa forma, as principais diferenças e possíveis influências serão apresentadas a seguir.

a. Redução de volume e mudança na taxa de desaguamento

A Figura 4.9 mostra o volume de água drenado dos tubos ao longo de quatro semanas para os ensaios TG-SD e TG-3FE. A estabilização das leituras no final da segunda, terceira e quarta semana pode ser notada no ensaio TG-3FE. Para o ensaio TG-SD, a estabilização do volume de água drenada pode ser observada 13 dias após o enchimento. A utilização de três estágios de enchimento levou a um volume de água drenada 29% maior em relação ao ensaio com um único estágio de enchimento.

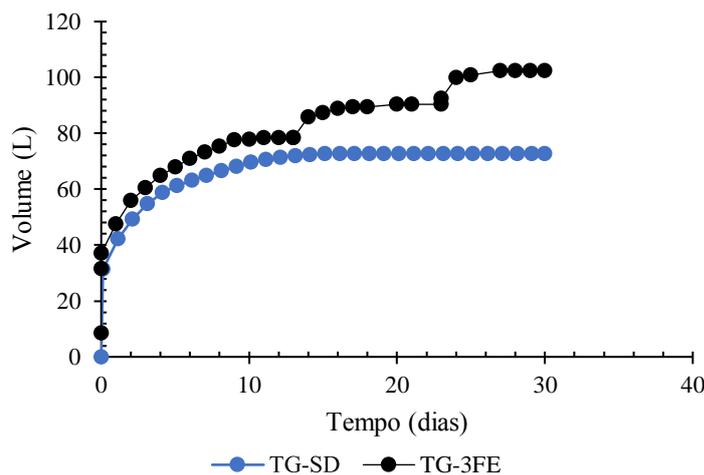


Figura 4.9 - Volume acumulado de água drenada durante os ensaios.

A variação da altura do tubo com o tempo foi registrada ao longo dos ensaios TG-SD e TG-3FE, conforme mostrado na Figura 4.10. Assim, nota-se que a taxa de variação da altura do tubo após cada etapa de enchimento diminuiu no ensaio TG-3FE. Segundo Yee & Lawson (2012), à medida que o número de estágios de drenagem aumenta, o volume de sólidos e flocos depositados no tubo também aumenta, diminuindo assim a variação de altura entre cada estágio

de enchimento. Um comportamento semelhante pode ser observado nas duas primeiras semanas nos dois ensaios, no entanto, o TG-SD apresentou 9% de diferença de altura no final da segunda semana quando comparado com o ensaio TG-3FE. A formação de camadas de material sedimentado no fundo do tubo ocorre mais rapidamente entre os primeiros 3 e 5 dias após o processo de enchimento, associada a uma maior saída de água livre (Figura 4.9). Dessa forma, a transição de um processo dominado pelo desaguamento para outro dominado pelo adensamento ocorre dentro do material retido nos tubos, conforme descrito por Lawson (2008).

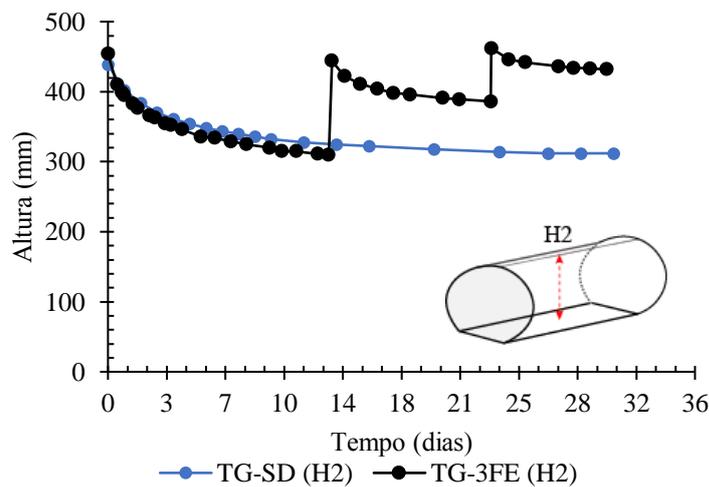


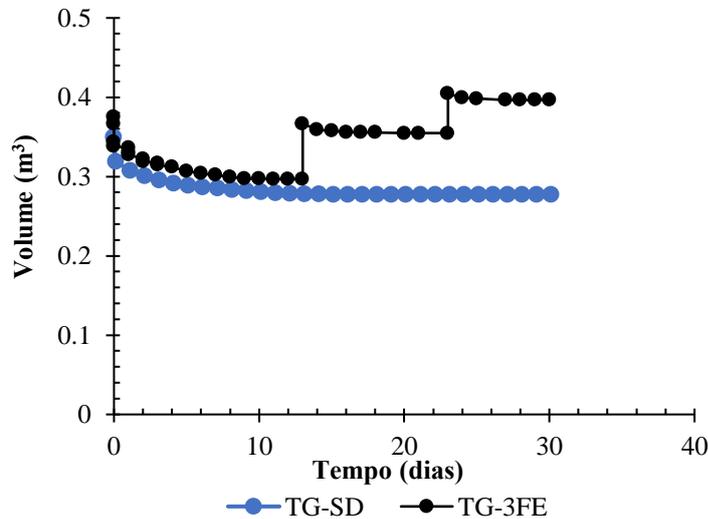
Figura 4.10 - Variação da altura do tubo com o tempo

O volume de lama introduzido no tubo foi medido para cada estágio de enchimento. A Figura 4.11 apresenta a variação do volume total do tubo com o tempo durante os ensaios TG-SD e TG-3FE. A mudança no volume de lama contida dentro do tubo de geotêxtil e a mudança na concentração de sólidos estão relacionadas (Lawson, 2008). Para um único ciclo de enchimento-desaguamento, o aumento esperado na concentração de sólidos pode ser determinado para uma determinada redução no volume da lama retido conforme (Lawson, 2008):

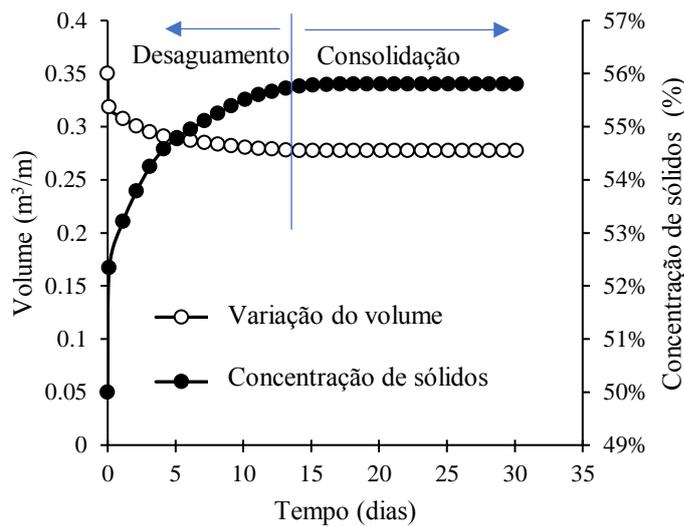
$$S_t = \frac{\left(\frac{1}{1 - \Delta V_t}\right) \left(\frac{S_0}{1 - S_0}\right)}{1 + \left(\frac{1}{1 - \Delta V_t}\right) \left(\frac{S_0}{1 - S_0}\right)} \quad (5.1)$$

Onde S_t é a concentração de sólidos no tempo t , ΔV_t é a redução do volume da lama contida ao longo do tempo t e S_0 é a concentração inicial de sólidos.

A partir da variação do volume de lama registrado no ensaio TG-SD na Figura 4.11a, é possível obter a variação da concentração teórica com o tempo utilizando a equação 1, conforme mostrado na Figura 4.11b. Há uma redução gradativa do volume à medida que a água escoa, consequentemente levando um aumento na concentração de sólidos com o tempo. Assim, de acordo com a solução teórica obteve-se um aumento de 9,6% de concentração no quinto dia e um 11,6 % no final do ensaio, o que evidencia a influência do processo de desaguamento nos primeiros dias, diminuindo ao longo do tempo.



(a)



(b)

Figura 4.11 - Variação do volume do tubo e concentração de sólidos com o tempo (a) Variação do volume versus tempo; (b) Volume e concentração de sólidos versus tempo - TG-SD.

De acordo com Yee & Lawson (2012), uma vez atingido um comportamento estável entre o volume retido no interior do tubo e a concentração de sólidos, o processo passa a ser

controlado principalmente pela consolidação, caracterizado por pequenas mudanças de volume de água drenada, altura do tubo geotêxtil e taxa de desaguamento (Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11, respectivamente).

O volume de efluente do tubo geotêxtil registrado ao longo do tempo foi utilizado para calcular a variação da vazão de desaguamento com o tempo conforme mostrado na Figura 4.12. Assim, valores máximos aos 14 e 24 dias correspondem ao início da 2ª e 3ª etapa de enchimento no ensaio TG-3FE. Pode-se notar que neste ensaio, após a primeira etapa de enchimento, a taxa de desaguamento chegou próximo de zero ($1,17 \text{ E-}8 \text{ L/s}$) após 13 dias. Por outro lado, nas etapas posteriores o tempo foi reduzido para três e quatro dias mostrando que a capacidade de drenagem do geotêxtil envolvente não foi comprometida durante o tempo de ensaio. Para o ensaio TG-SD a drenagem observada foi quase nula ($1,29\text{E-}8 \text{ L/s}$) após aproximadamente 17 dias de ensaio.

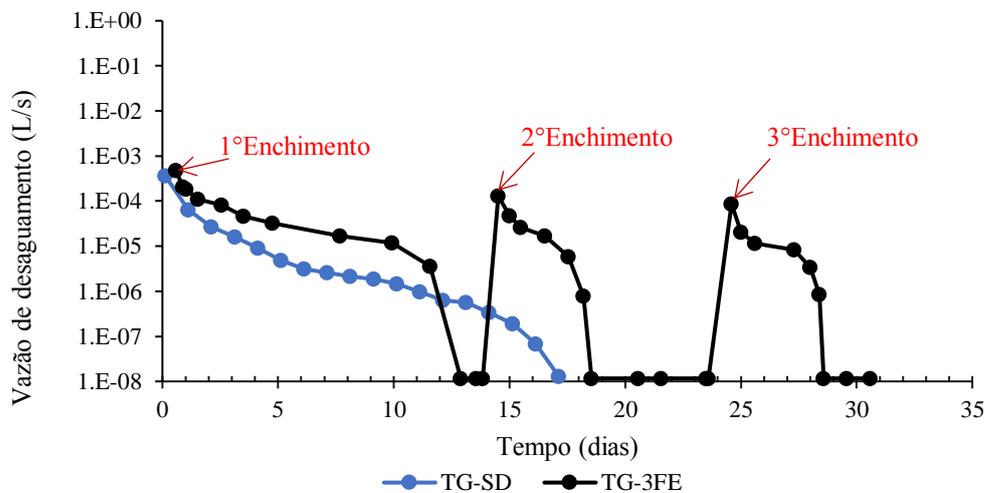


Figura 4.12 - Variação da vazão de desaguamento com o tempo.

b. Poropressões e tensões totais

A Figura 4.13 apresenta a variação da poropressão na base do tubo com o tempo. Como esperado, as poropressões máximas ocorrem no início do estágio de enchimento nos ensaios TG-SD e TG-3FE. Após o enchimento, os transdutores de pressão (P-01, P-02 e P-03, Figura 4.13a) registraram valores máximos de poropressão de 3,45 kPa, 2,52 kPa e 3,12 kPa no ensaio TG-SD, dependendo do transdutor considerado. Assim, uma redução contínua da poropressão com o tempo pode ser observada. Após 4 semanas de ensaio, as poropressões variaram entre 0 e 0,5 kPa.

Os valores máximos de 5,5 kPa, 5,28 kPa e 5,98 kPa no ensaio TG-3FE foram registrados pelos transdutores de pressão P1P, P2P e P3P (Figura 4.13b). Durante cada estágio de desaguamento, as poropressões diminuíram gradualmente. Após quatro semanas de ensaio, as poropressões variaram entre 0,26 kPa a 0,46 kPa. Assim, valores iniciais maiores de poropressão registrados no tubo no ensaio TG-3FE, em comparação com os obtidos no ensaio TG-SD, provavelmente são uma consequência do impacto do jato da lama de entrada nos transdutores de pressão na base do tubo nos estágios iniciais dos ensaios.

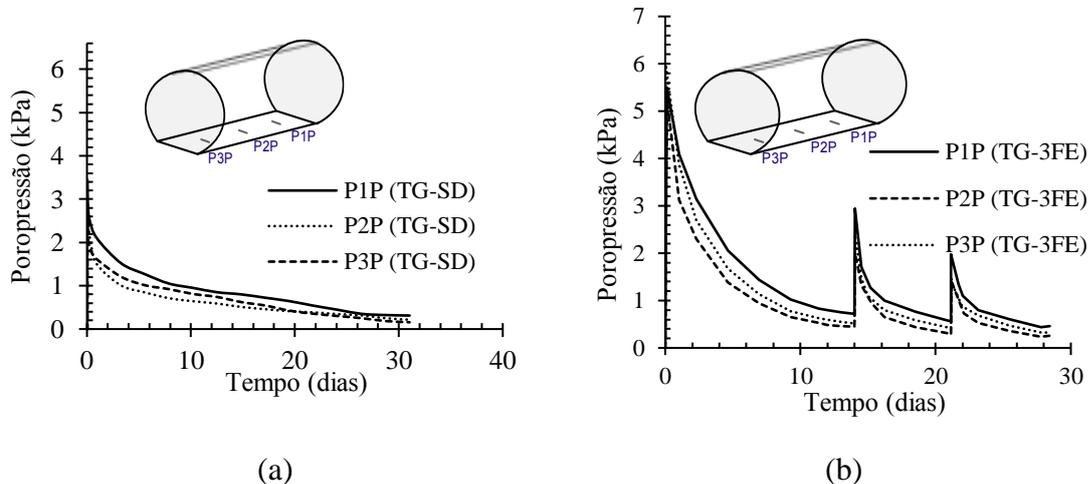


Figura 4.13 - Variação da poropressão com o tempo; a) TG-SD; b) TG-3FE.

A Figura 4.14 mostra a variação da tensão vertical normalizada na base do tubo com o tempo para o ensaio TG-SD. A tensão vertical total na base foi normalizada pelo produto $\gamma \cdot h_T$, onde γ é o peso específico final do solo e h_T é a altura final do tubo. Dessa forma, percebe-se que maiores tensões verticais iniciais são consequência do processo de enchimento causado pelo impacto do jato de lama nas células de tensão. Uma diminuição na tensão vertical total normalizada devido ao desaguamento pode ser notada ao longo do teste até se atingirem valores entre 1,05 e 0,97.

A variação das tensões verticais totais normalizadas na base do tubo para o ensaio TG-3FE está representada na Figura 4.15. Podem ser observadas tensões verticais iniciais semelhantes às observadas no ensaio TG-SD, seguidas de reduções com o tempo. Em comparação ao ensaio TG-SD, pode-se observar um aumento de 16,5% na tensão vertical final com o aumento do número de estágios de enchimento devido à densidade final do solo ligeiramente maior ao final do ensaio TG-3FE. Neste caso, a tensão vertical total normalizada variou entre 1,09 e 1,13 no final da última etapa de desaguamento.

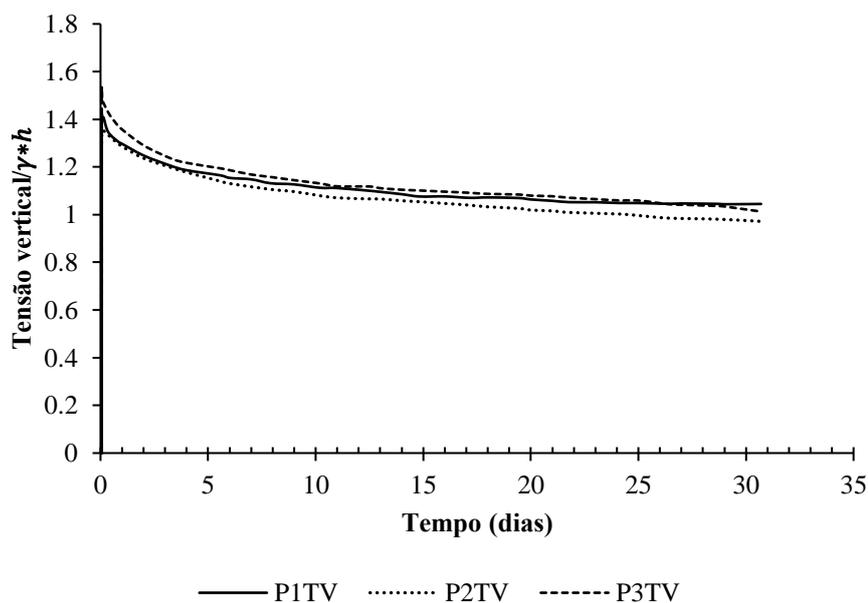


Figura 4.14 - Tensão total normalizada na base do tubo versus tempo – ensaio TG-SD.

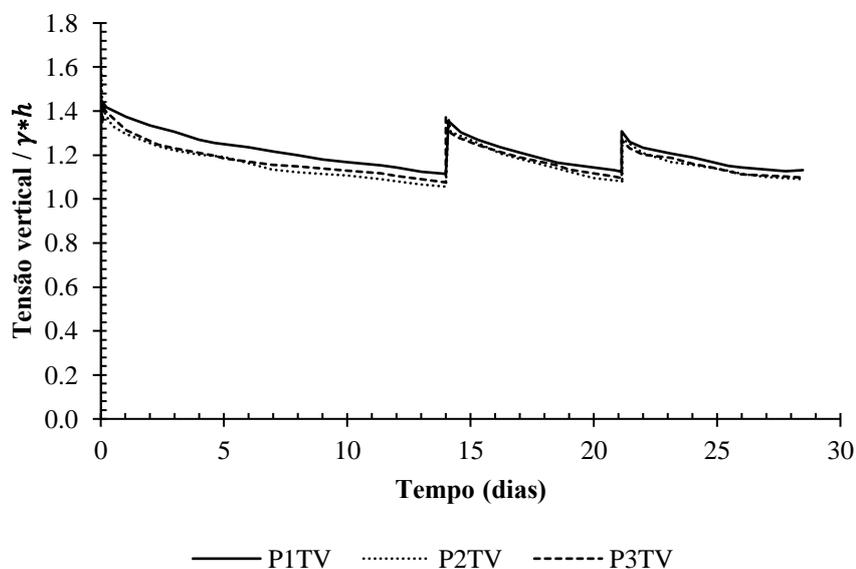


Figura 4.15 - Tensão total normalizada na base do tubo versus tempo - TG-3FE.

c. Deformações no geotêxtil

A Figura 4.16 mostra a variação da deformação no geotêxtil ao longo do perímetro do tubo ao final dos ensaios TG-SD e TG-3FE, após as etapas de desaguoamento. A deformação máxima de tração foi alcançada na coroa do tubo em ambos os testes, diminuindo em direção à sua base. Assim, a deformação máxima medida (faixa I, Figura 4.16) no ensaio TG-3FE foi 8,3% maior do que a máxima obtida pelo ensaio TG-SD, mostrando o efeito de múltiplos estágios de enchimento na mobilização de deformações no geotêxtil.

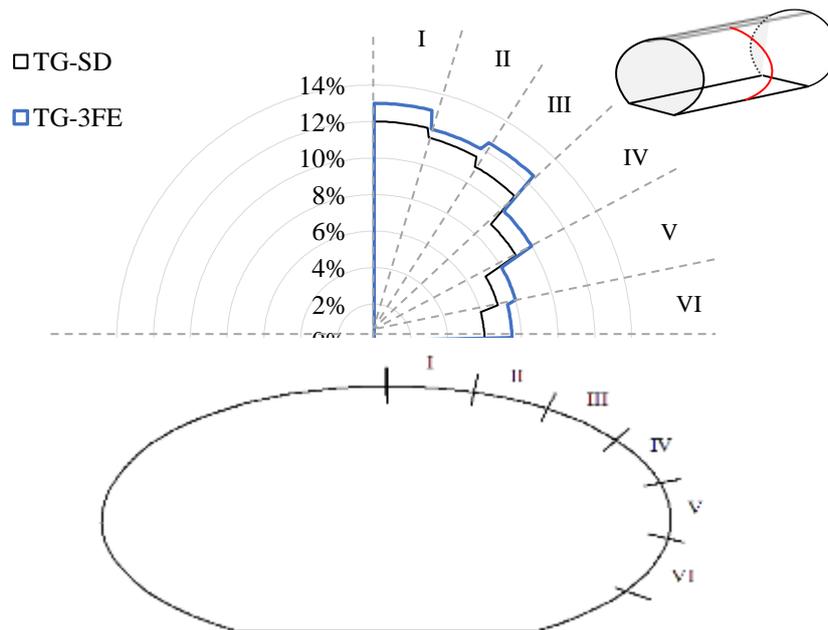


Figura 4.16 - Variação da deformação de tração ao longo do perímetro do tubo nos ensaios TG-SD e TG-3FE.

d. Dimensões das partículas que assaram pelo geotêxtil

A Figura 4.17 mostra a distribuição granulométrica das partículas (ensaios sem o agente dispersante) que passaram pelo geotêxtil durante os ensaios, bem como a curva de granulometria das partículas do solo original para comparação. Esta figura mostra que o valor máximo do diâmetro das partículas que passaram pelo geotêxtil (tomado como d_{95} , que é o diâmetro de partícula para o qual 95% das partículas restantes são menores) foi igual a 0,073 mm no ensaio TG-SD e 0,093 mm no ensaio TG-3FE, que são valores menores que o tamanho da abertura de filtração do geotêxtil ($O_{95} = 0,115$ mm, Tabela 3.1). Assim, o aumento do número de estágios de enchimento pode ter facilitado a passagem de material mais grosso através do geotêxtil. Isso pode ser consequência de vibrações do tubo a cada estágio de enchimento.

Ressalta-se que não foi adicionado agente floculante à lama nos ensaios atuais e que a camada de geotêxtil é tensionada neste tipo de aplicação. No entanto, Palmeira *et al.*, (2019) relataram pouca variação nos tamanhos de abertura de filtração de geotêxteis submetidos à tensão sob condições de deformação plana.

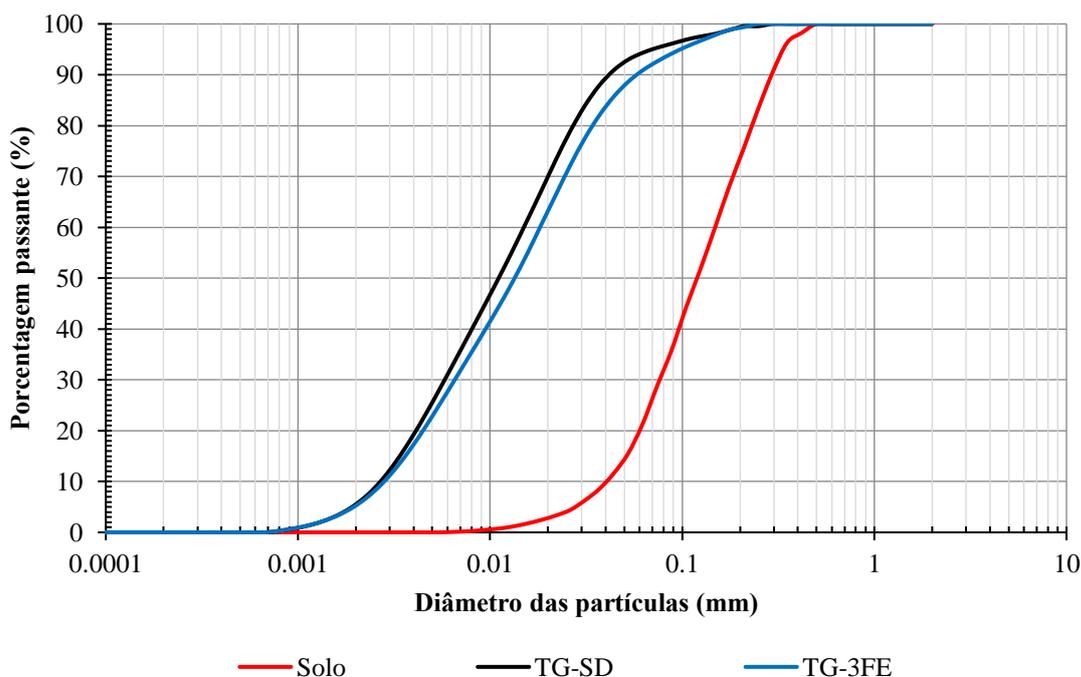


Figura 4.17 - Distribuição de partículas de solo que passaram pelo geotêxtil.

A massa total do solo que passou através do geotêxtil no ensaio TG-3FE foi de 8,51 g contra 6,06 g no ensaio TG-SD. Portanto, apesar dos pequenos valores de massa passante, o aumento do número de estágios de enchimento resultou em um aumento de 40,4%. Em relação à área superficial total do tubo geotêxtil disponível para a passagem de partículas, os valores obtidos foram de 3,39 g/m² para o ensaio TG-3FE e 2,41 g/m² para o ensaio TG-SD. Ou seja, valores muito pequenos para que se considere o efeito de “*piping*” como relevante.

e. Comparação entre volumes do tubo previsto e medido

Uma relação que estima o volume de um tubo geotêxtil em função de seu comprimento, altura de enchimento e diâmetro teórico foi proposta por Yee *et al.*, (2012). Segundo os autores, previsões satisfatórias podem ser obtidas para razões de altura de enchimento $h_T/D_T < 0,7$ pela seguinte equação (5.2)

$$V_T = L_T D_T^2 \left[\left(\frac{h_T}{D_T} \right)^{0.815} - \left(\frac{h_T}{D_T} \right)^{8.6} \right] \quad (5.2)$$

Onde V_T é o volume do tubo geotêxtil, L_T é o comprimento do tubo geotêxtil, h_T é a altura do tubo e D_T é o diâmetro teórico do tubo.

A comparação entre a variação de volume prevista e medida com o tempo para o ensaio TG-SD é mostrada na Figura 4.18a. Assim, a Equação 5.2 superestimou o volume do tubo em

aproximadamente 18% ao longo do teste. Por outro lado, a variação do volume do tubo geotêxtil para o ensaio TG-3FE é mostrada na Figura 4.18b. Pode-se notar uma melhor concordância entre os valores previstos e medidos, principalmente durante a última etapa de desaguardamento. Até o 3º estágio de desaguardamento, em média, a equação 5.2 superestimou o volume do tubo em aproximadamente 10% (Figura 4.18b), mas a acurácia da previsão melhorou ao final de cada estágio de desaguardamento.

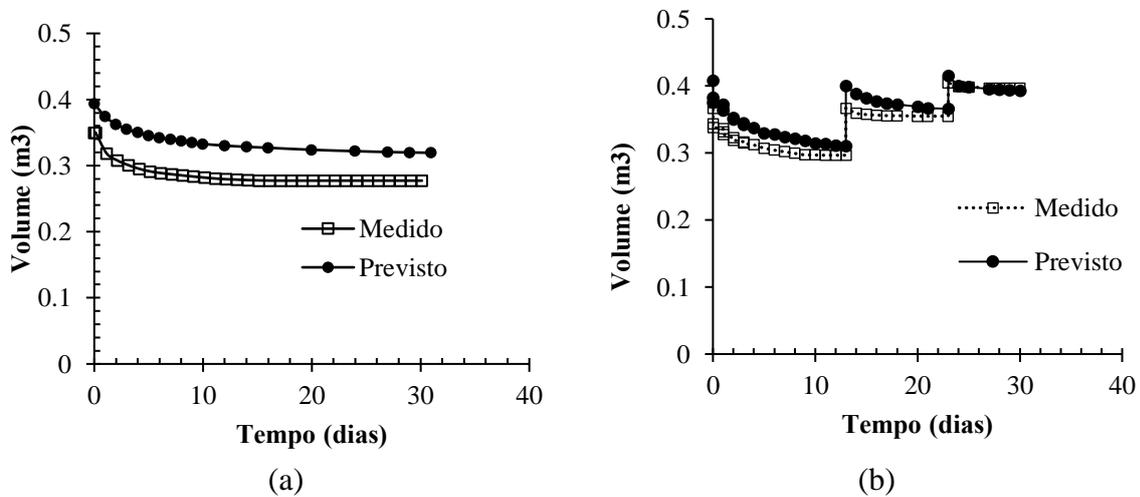


Figura 4.18 - Comparação entre volumes previsto e medido do tubo geotêxtil (a) Variação do volume no ensaio TG-SD; (b) Variação do volume no ensaio TG-3FE

f. Características geométricas do tubo e forças mobilizadas no geotêxtil

Como os métodos teóricos investigados consideram uma única etapa de preenchimento em suas formulações, será dada ênfase às comparações entre as previsões teóricas e as medidas realizadas no ensaio TG-SD. Além disso, os métodos requerem o conhecimento da pressão (p) empregada para encher o tubo para a previsão das deformações do tubo e das forças de tração no geotêxtil. No presente estudo, a média da poropressão máxima medida (3,01 kPa) pelos transdutores de poropressão durante o enchimento do tubo foi adotada nos cálculos.

A precisão das soluções disponíveis (Guo *et al.*, 2014, Plaut & Suherman, 1998 e Lawson, 2008) para a estimativa da forma e dimensões finais do tubo e da tensão vertical média na base também foram investigadas. A Figura 4.19 mostra a comparação entre a seção transversal final do tubo no final da etapa de enchimento no ensaio TG-SD e a previsão de Plaut & Suherman (1998). O método forneceu valores próximos aos medidos para a altura do tubo (desvio de 4,5%) e largura máxima (desvio de 5,5%), mas subestimou a largura da base do tubo em 20%.

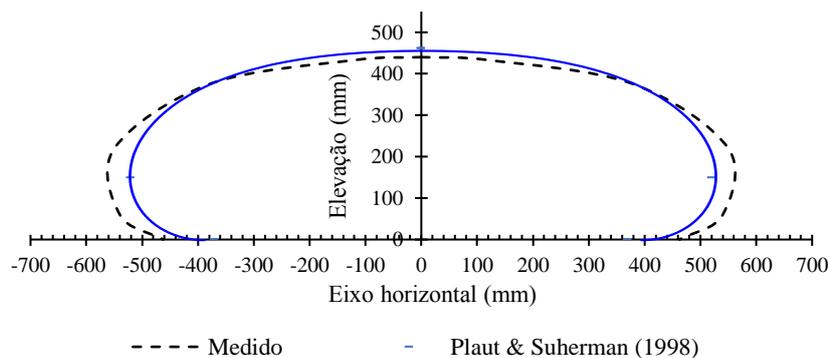


Figura 4.19 - Seção transversal do tubo prevista e medida no ensaio TG-SD no final do enchimento

A Figura 4.20 apresenta comparações entre as alturas prevista e medida do tubo e a largura da base ao final da etapa de enchimento do ensaio TG-SD. As previsões desviaram dos valores medidos entre 4,5% e 29,5%, sendo a melhor acurácia obtida pelas previsões de Lawson (2008) e Plaut & Suherman (1998). Guo *et al.*, (2014) subestimou a altura do tubo em 29,5%. Todos os três métodos investigados subestimaram a largura da base do tubo, com desvios de 13,5% (Lawson), 20,0% (Plaut & Suherman) e 37,3% (Guo *et al.*).

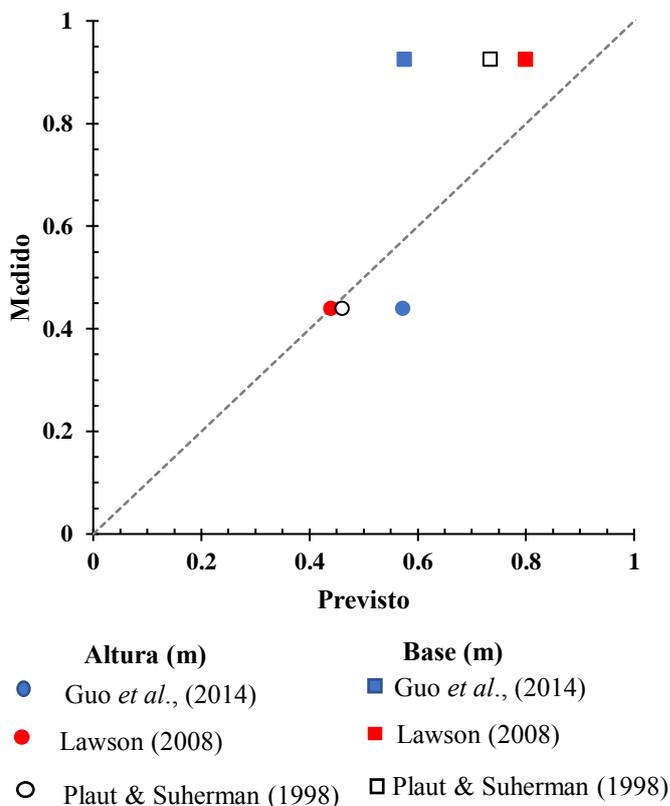


Figura 4.20 - Comparações entre as dimensões do tubo previstas e medidas - Ensaio TG-SD

As comparações entre as áreas da seção transversal do tubo prevista e medida, a largura máxima e a tensão vertical total na base do tubo são apresentadas na Figura 4.21. Nesta figura, a tensão vertical é normalizada pelo produto do peso específico da lama (13,5 kN/m³) e a altura final do tubo no final da etapa de enchimento. As previsões da área da seção transversal do tubo se desviaram das medidas em 4,7%, 11,6% e 9,3%, para os métodos de Guo *et al.*, (2014), Lawson (2008) e Plaut & Suherman (1998), respectivamente. Em relação às previsões de largura máxima de Guo *et al.*, (2014), Lawson (2008) e Plaut & Suherman (1998), os desvios dos valores medidos foram de 14,5%, 9,1% e 5,5%, respectivamente.

Os valores previstos de tensão vertical total normalizada na base do tubo apresentaram resultados próximos aos medidos (Figura 4.21), com desvios de 2,1% para os métodos de Lawson (2008) e 2,6% para os métodos de Plaut & Suherman (1998), respectivamente.

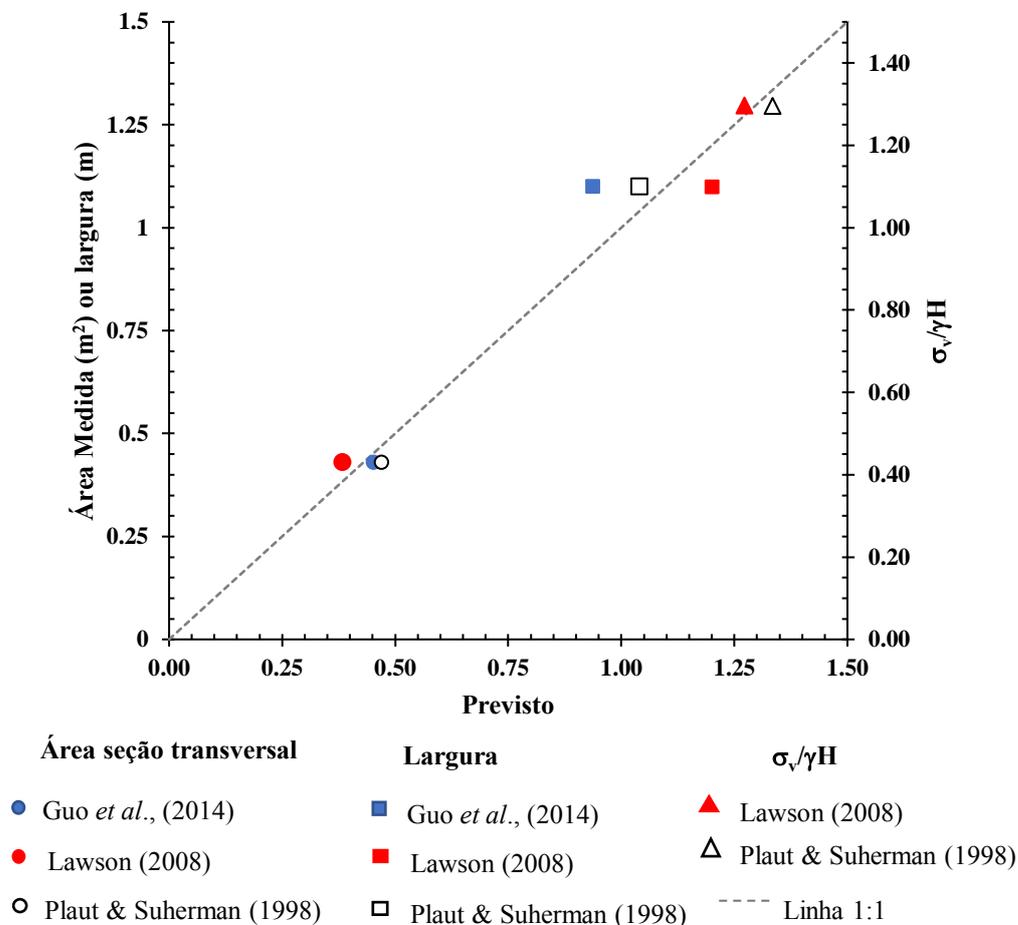


Figura 4.21 - Comparações entre as dimensões do tubo previstas e medidas, e tensões verticais na base do tubo após o enchimento - Ensaio TG-SD

A Tabela 4.2 mostra as forças de tração mobilizadas máximas e mínimas no tubo nos ensaios TG-SD e TD-3FE. As forças de tração foram calculadas como o produto entre as

deformações de tração medidas e a rigidez à tração do geotêxtil (11,5 kN/m, Tabela 3.1). A Tabela 4.2 também apresenta as previsões de forças de tração por Plaut & Suherman (1998) e Guo *et al.* (2014) (estágio de enchimento único assumida). Assim, as forças de tração mobilizadas no ensaio TG-SD variaram entre 0,81 kN/m e 1,49 kN/m após o enchimento (Tabela 4.2) dependendo da localização ao longo do perímetro considerado do tubo. O método de Plaut & Suherman previu um valor de 1,26 kN/m para a força de tração do geotêxtil. Dessa forma, a força de tração prevista por esse método ficou mais próxima da força de tração máxima medida no geotêxtil, porém com um desvio de 15,4%. Por outro lado, Guo *et al.*, (2014) previram uma força de tração de 1,96 kN/m, que é 31,5% maior que o valor máximo medido durante o ensaio.

Tabela 4.2 - Forças de tração de geotêxteis mobilizadas (final de enchimento e no final do ensaio) e previstas (final de enchimento).

Etapa	Alcance	TG-SD (kN/m)	TG-3FE (kN/m)	Plaut Suherman (kN/m)	& Guo et al. (kN/m)
Após enchimento	Máximo	1.49	1.38	1.26	1.96
	Mínimo	0.81	0.81		
Final do ensaio	Máximo	1.38	1.49		
	Mínimo	0.69	0.86		

4.2.2 INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE DESAGUAMENTO NO COMPORTAMENTO DOS TUBOS GEOTÊXTEIS

O processo de desaguamento quando se tem uma fronteira drenante central no tubo (TG-CD) foi analisado comparando-se os resultados obtidos nos ensaios TG-CD e TG-SD. Para isso são apresentados os resultados de variação do volume do material retido dentro do tubo com o tempo, a mudança na altura e o comportamento do material argiloso retido dentro do tubo em termos de tensões totais, propressão e resistência não drenada.

a. Redução de volume e variações na taxa de desaguamento

Na Figura 4.22 mostra-se o volume de água drenada dos tubos TG-CD e TG-SD ao longo de 4 semanas. Dessa forma, percebe-se uma estabilização das leituras no final da segunda semana para o ensaio TG-SD. No entanto, a estabilização do ensaio TG-CD ocorre quatro dias

antes do ensaio TG-SD, sendo já observada no início da segunda semana. No final do ensaio registrou-se um aumento no volume de água de 5,1% em relação ao ensaio TG-SD. A rápida estabilização e o leve aumento no volume de água é consequência da aceleração no processo de desaguentamento devido ao sistema de drenagem instalado no interior do TG-CD.

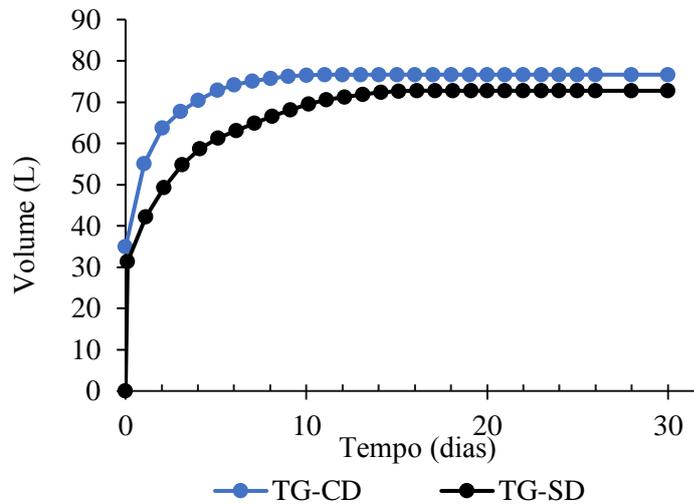


Figura 4.22 - Volume acumulado de água drenada nos ensaios TG-CD e TG-SD

A variação da altura dos tubos com o tempo foi obtida ao longo dos ensaios TG-CD e TG-SD, conforme mostrado nas Figura 4.23 e Figura 4.24. Nessas figuras, são plotados três pontos de monitoramento, sendo o ponto H2 localizado na metade dos tubos (Figura 4.23 e Figura 4.24). Assim, nota-se uma diminuição gradativa da altura ao longo do tempo, sendo mais significativa na primeira semana para os dois ensaios. De acordo com Ratnayesuraj & Bathia (2018) a fase de rebaixamento ocorre quando a água livre dentro do tubo continua saindo devido à ação da gravidade e uma combinação de pressões internas ou externas. Portanto, a saída de água livre durante e após o processo de enchimento é verificada na Figura 4.22, e pela variação da altura do tubo, principalmente nos primeiros dias de ensaio (Figura 4.23 e Figura 4.24).

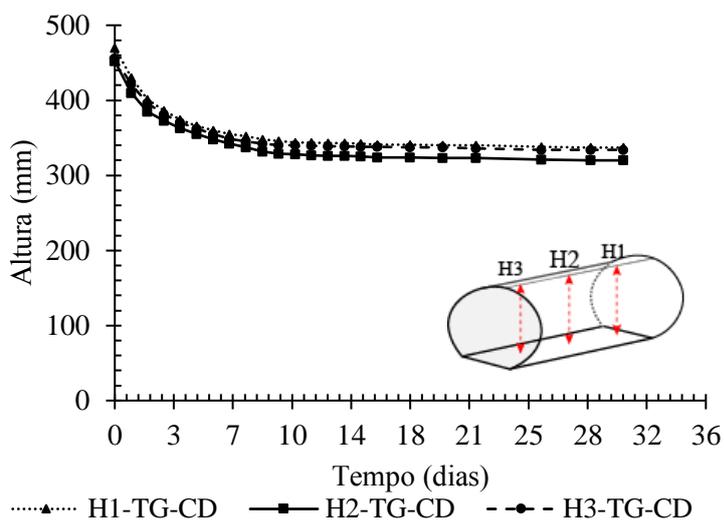


Figura 4.23 - Variação da altura TG-CD

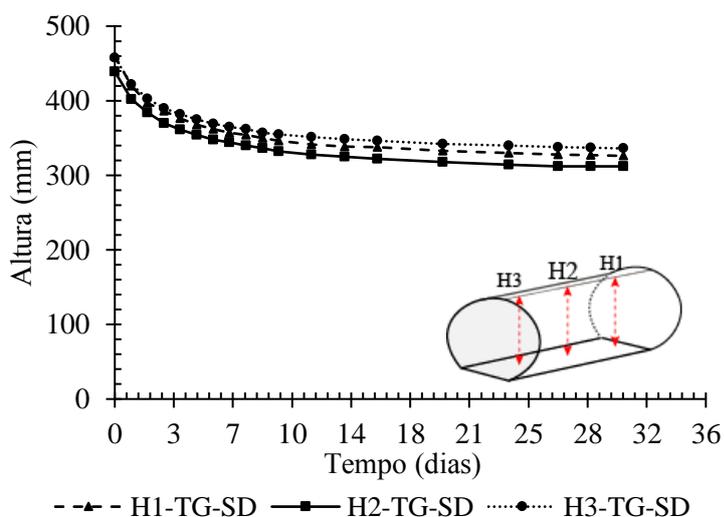


Figura 4.24 - Variação da altura TG-SD

A Figura 4.25 e Figura 4.26 apresentam a variação do volume total do tubo após o enchimento para os ensaios TG-CD e TG-SD, respectivamente. Com a variação do volume de lama registrado no ensaio TG-CD da Figura 4.25, foi possível obter a variação da concentração de sólidos teórica com o tempo utilizando a equação 5.1 (Figura 4.25). Portanto, é constatado uma redução gradativa do volume à medida que a água escoou, conseqüentemente um aumento na concentração de sólidos com o tempo. Pode-se notar que à medida que o volume da lama no interior do tubo diminuiu, a concentração de sólidos aumenta, principalmente no início do processo de desagüamento. Por outro lado, um comportamento similar é apresentado no ensaio TG-SD (Figura 4.26) com a diferença em que o processo dominado pela consolidação é desenvolvido de forma mais tardia comparada com o ensaio TG-CD.

De acordo com Lawson (2008), após o enchimento dos tubos é desenvolvido dois processos, inicialmente dominado pelo desaguamento e o processo de consolidação que vai se intensificando com o passo do tempo. Dessa forma, identifica-se os processos nos ensaios TG-CD e TG-SD sendo o ensaio com sistema de drenagem (TG-CD) o qual apresenta de forma mais antecipada dita transição quando comparados com os resultados do ensaio TG-SD.

A predominância do processo de consolidação de acordo com Yee & Lawson (2012), é atingido com a estabilização do volume retido no interior do tubo e a concentração de sólidos. Dessa forma, podem ser também verificadas em pequenas variações de volume de água livre, altura do tubo geotêxtil, volume da lama retido no tubo e a taxa de desaguamento (Figura 4.22 até -Figura 4.27, respectivamente) ao longo do tempo.

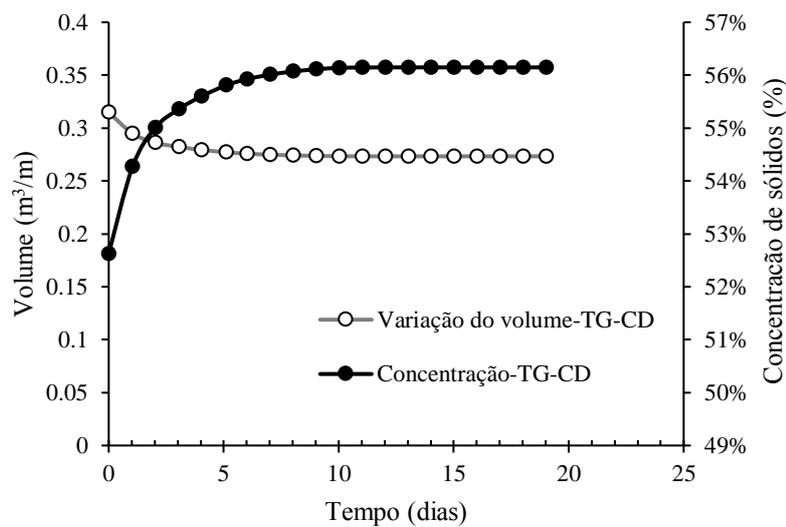


Figura 4.25 - Variação de volume vs. Concentração no ensaio TG-CD

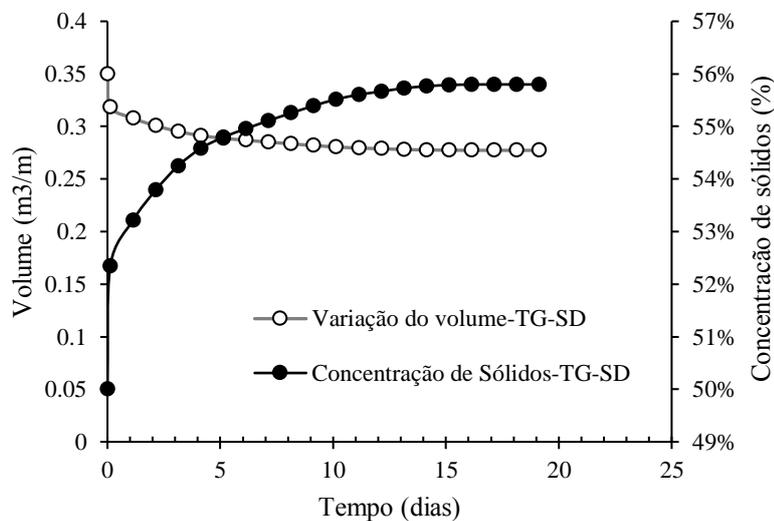


Figura 4.26 – Variação de volume vs. Concentração no ensaio TG-SD

Na Figura 4.27 apresenta-se a variação de vazão de desaguamento com o tempo, obtida a partir do registro do volume de efluente do tubo de geotêxtil ao longo do tempo. Dessa forma, maior vazão é desenvolvida no tubo TG-CD no início do ensaio com uma redução considerável no final da primeira semana. Por outro lado, o ensaio TG-SD apresentou menor vazão no início do ensaio, no entanto o processo de desaguamento foi prolongado por até aproximadamente 17 dias, porém com valores bem reduzidos. Apesar da vazão ser baixa nos dois ensaios, percebe-se uma diferença na taxa de desaguamento de 20,4% um dia após o enchimento, o que mostra a aceleração no processo de desaguamento por meio do sistema de drenagem instalado no ensaio TG-CD, além disso, a capacidade de drenagem do geotêxtil envolvente não foi comprometida durante o ensaio.

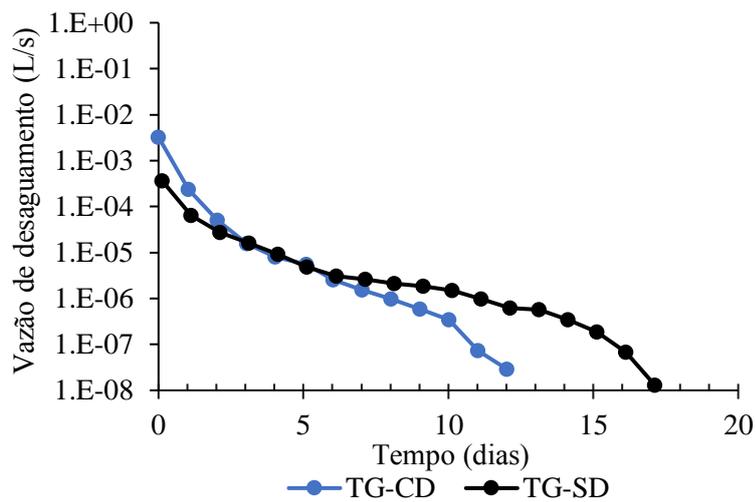


Figura 4.27 - Variação da vazão de desaguamento

b. Poropressões e tensões totais

A Figura 4.28 apresenta a variação da poropressão na base do tubo com o tempo. As poropressões máximas ocorrem no início do estágio de enchimento nos dois ensaios executados. Assim, após o enchimento, os transdutores de pressão utilizados no ensaio TG-CD (P1P, P2P e P3P, Figura 4.28) registraram valores máximos de 3,25 kPa, 2,5 kPa e 3,10 kPa (respectivamente). Assim como comentado anteriormente, estes valores podem ter sido influenciados pelo impacto do jato de lama nos transdutores de pressão nos estágios iniciais do ensaio. No entanto, uma redução considerável das poropressões foi registrada na primeira semana no ensaio TG-CD, em relação ao ensaio TG-SD (Figura 4.29), o que pode ser justificada por melhores condições de drenagem no ensaio TG-CD.

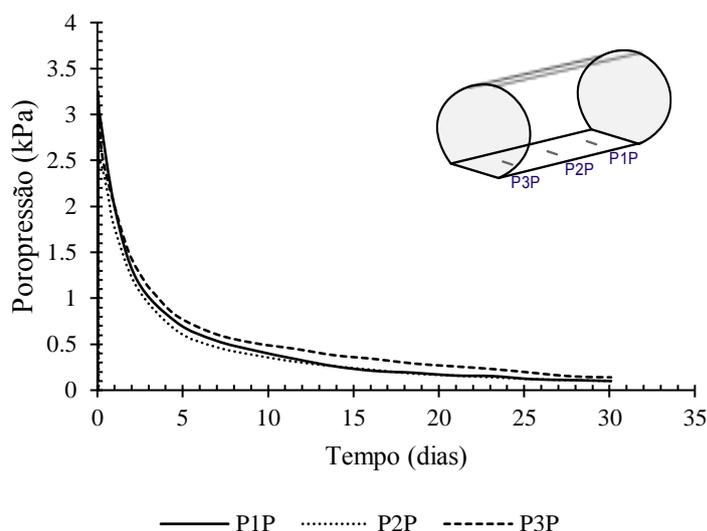


Figura 4.28 - Poropressões medidas no ensaio TG-CD

Os valores máximos de 3,45, 2,52 e 3,12 no ensaio TG-SD foram registrados pelos transdutores de pressão P1P, P2P e P3P (Figura 4.29). Uma redução contínua da poropressão com o tempo também pode ser observada. Após 4 semanas de ensaio, valores de poropressão variando de 0,1 a 0,3 kPa foram alcançados. Deve-se atentar que o comportamento das poropressões desenvolvidas principalmente na primeira semana de ensaio sofreram uma redução gradativa após o enchimento, no entanto, essa redução foi mais lenta se comparada aos resultados do ensaio TG-CD.

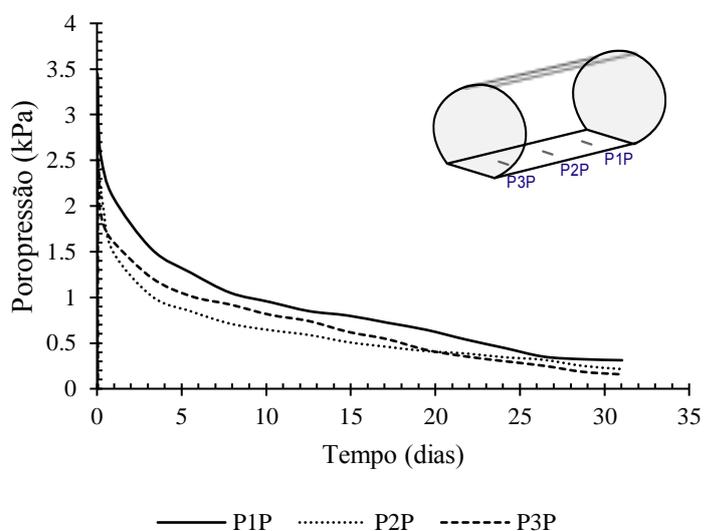


Figura 4.29 - Poropressões medidas no ensaio TG-SD

Na Figura 4.30 mostra-se a variação da tensão vertical normalizada na base do tubo com o tempo para o ensaio TG-CD. Dessa forma, também se percebe que maiores tensões verticais

iniciais podem ser consequência ao impacto do jato de lama nas células de tensão. Uma redução na tensão vertical total normalizada devido ao desaguamento pode ser notada ao longo do ensaio até atingirem-se valores entre 0,95 e 0,98.

A variação das tensões verticais totais normalizadas na base do tubo para o ensaio TG-SD é mostrada na Figura 4.31. As tensões verticais iniciais máximas após o final do enchimento apresentam comportamento semelhante às observadas no teste TG-CD, seguida por uma redução contínua até o final da etapa de desaguamento. Com isso, pode-se notar que a tensão vertical total normalizada na base no ensaio TG-SD variou entre 1,05 e 0,97 no final do ensaio.

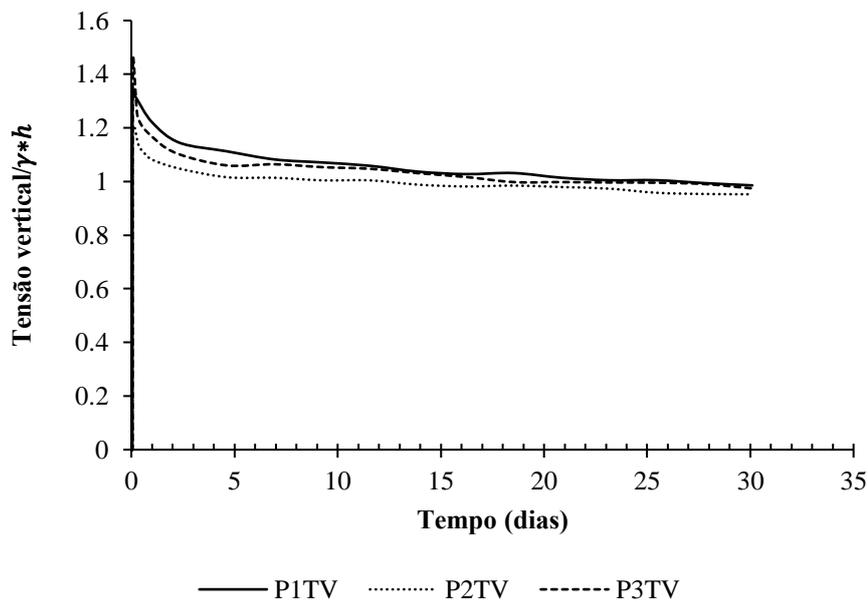


Figura 4.30 - Tensão total normalizada vs tempo no ensaio TG-CD

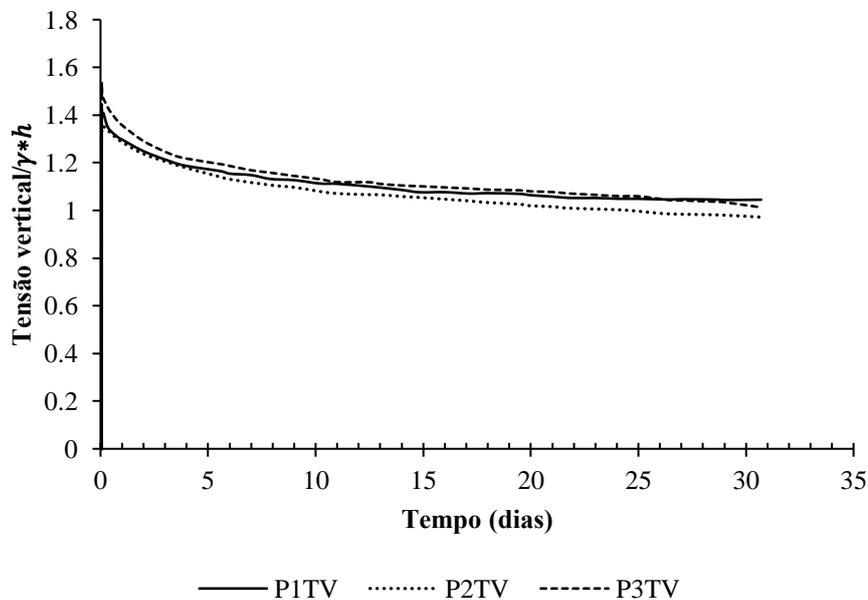


Figura 4.31 - Tensão total normalizada vs tempo no ensaio TG-SD

c. Deformações no geotêxtil

As variações de deformação no geotêxtil ao longo do perímetro do tubo no final do estágio de enchimento para os ensaios TG-CD e TG-SD é apresentado na Figura 4.32. A máxima deformação de tração foi atingida na coroa do tubo em ambos os ensaios diminuindo em direção à base do tubo, com deformações menores na base do tubo no ensaio TG-CD. Ao final do ensaio (Figura 4.33) percebe-se uma redução da deformação em todas as faixas de medição. Assim, para o ensaio TG-CD observou-se uma redução no final do ensaio de 7,7% na coroa do tubo, e 10% de redução na faixa VI, próxima à base. Por outro lado, o ensaio TG-SD também registrou uma redução de 7,7% na faixa I e de 14,3% próximo à base.

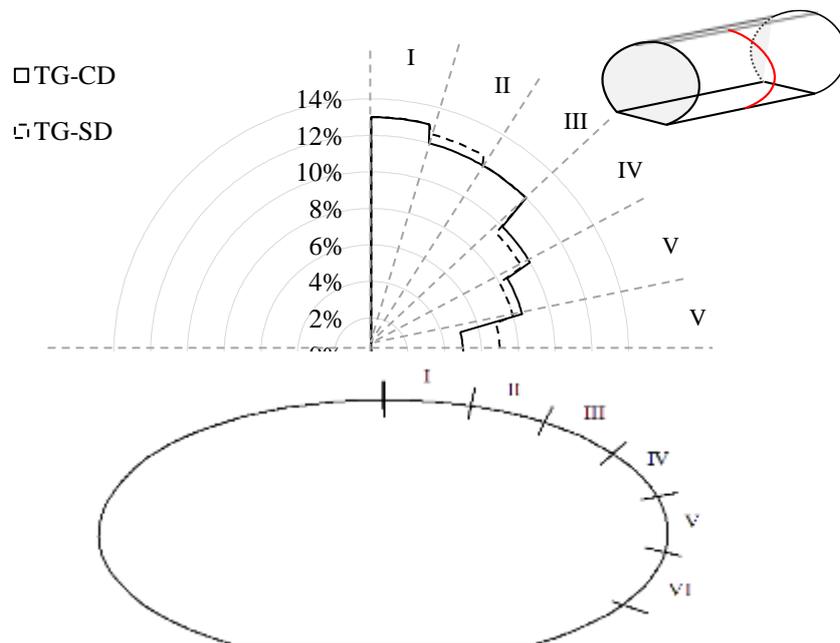


Figura 4.32 - Deformações no geotêxtil nos ensaios TG-CD e TG-SD após enchimento

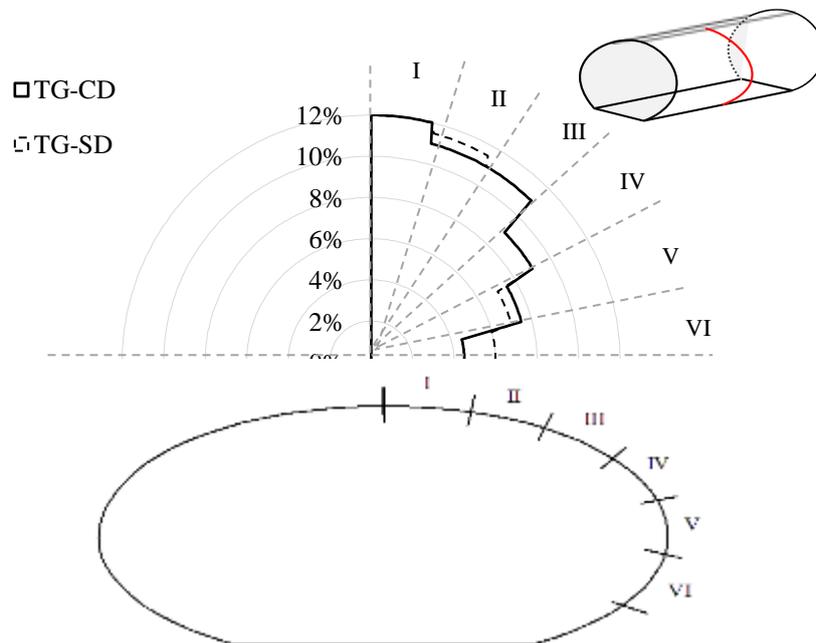


Figura 4.33 - Deformação no geotêxtil nos ensaios TG-CD e TG-SD final do ensaio

d. Comparação entre previsões e medições do volume do tubo

As comparações entre variações do volume prevista (equação 5.2) e medida com o tempo para o ensaio TG-CD é mostrada na Figura 4.34. A equação 5.2 superestimou o volume do tubo em aproximadamente 17% ao longo do ensaio. As variações do volume do tubo geotêxtil para o ensaio TG-SD são apresentadas na Figura 4.35. Nesse caso, nota-se uma diferença de cerca de 13% entre os valores previstos e medidos. Apesar de existir uma diferença entre valores previstos e medidos, a equação 5.2 pode ser útil para estimativas preliminares da quantidade de material retido nos tubos.

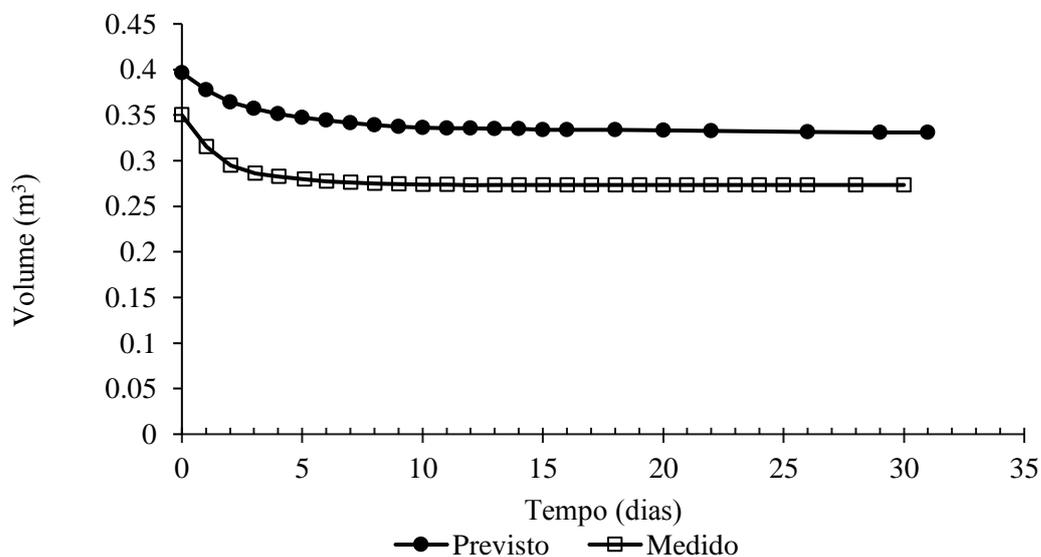


Figura 4.34 - Volume previsto vs. volume medido ensaio TG-CD

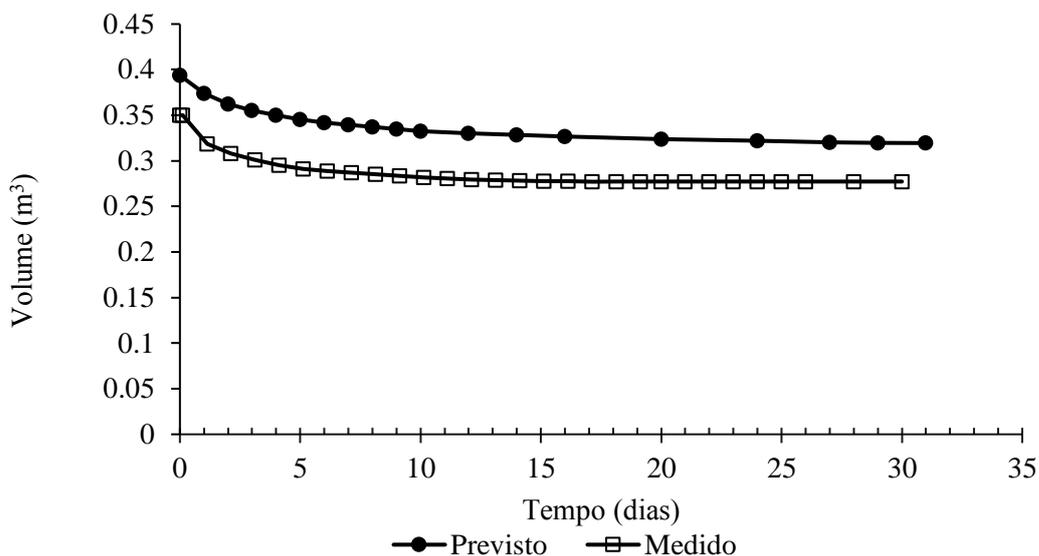


Figura 4.35 - Volume previsto vs. volume medido ensaio TG-SD

e. Características geométricas do tubo e forças mobilizadas no geotêxtil

Os métodos para prever as características geométricas do tubo, como altura, largura da base e largura máxima foram utilizados e comparados com os valores medidos nos ensaios TG-CD e TG-SD. A média da poropressão máxima medida pelos transdutores de pressão durante o enchimento do tubo foi adotada nos cálculos como pressão de enchimento, sendo elas iguais a 2,95 kPa e 3,01 kPa para os ensaios TG-CD e TG-SD, respectivamente.

As comparações entre a altura do tubo (prevista e medida) e largura da base ao final da etapa de enchimento no ensaio TG-CD são apresentadas na Figura 4.36. As previsões apresentaram diferenças em relação aos valores medidos entre 2,65% e 25,9% com melhor acurácia para as previsões por Plaut & Suherman (1998) e Lawson (2008). Guo *et al.*,(2014) superestimou a altura em 5,9%. Por outro lado, a largura da base do tubo foi subestimada pelos três métodos com desvios de 13,98% (Lawson), 19,9% (Plaut & Suherman) e 37,4% (Guo *et al.*).

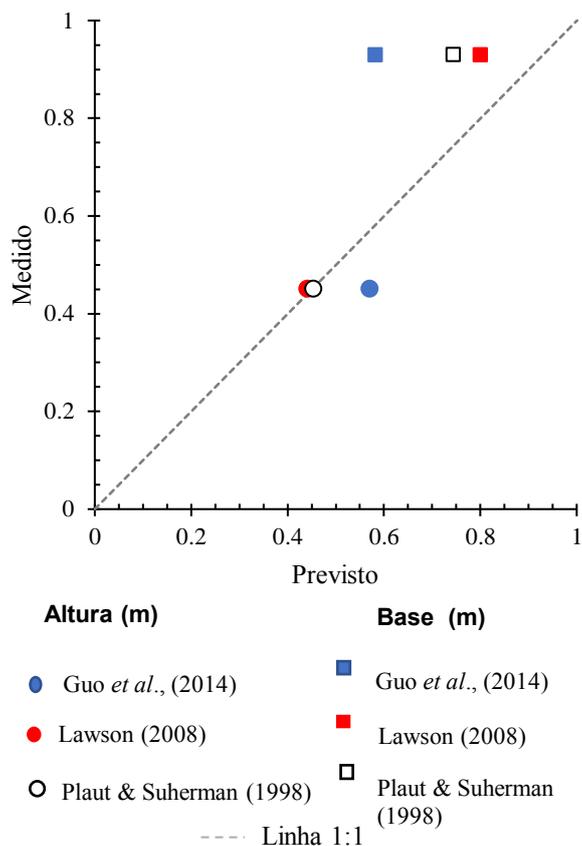
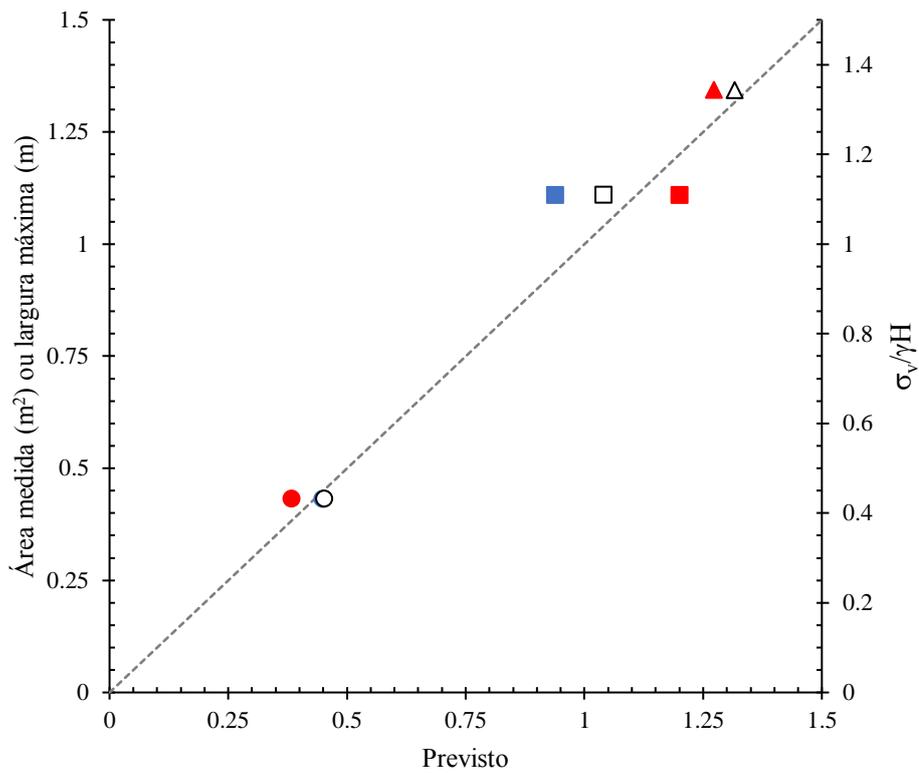


Figura 4.36 - Comparações entre as dimensões do tubo previstas e medidas - TG-CD

A Figura 4.37 mostra as comparações entre as áreas da seção transversal do tubo prevista e medida, a largura máxima e a tensão total na base do tubo. As previsões da área da seção transversal mostraram desvios em relação aos valores medidos de 3,9%, 4,86% e 12,04% para os métodos de Guo *et al.*, (2014), Plaut & Suherman (1998) e Lawson (2008), respectivamente. Por outro lado, pouca diferença foi observada entre os valores previstos e medidos de tensão total normalizada na base do tubo, sendo elas de 1.5% (Plaut & Suherman) e 5.2% (Lawson).



Área-seção transversal	Largura máxima	$\sigma_v/\gamma H$
● Guo <i>et al.</i> , (2014)	■ Guo <i>et al.</i> , (2014)	▲ Lawson (2008)
● Lawson (2008)	■ Lawson (2008)	△ Plaut & Suherman (1998)
○ Plaut & Suherman (1998)	□ Plaut & Suherman (1998)	---- Linha 1:1

Figura 4.37 - Comparações entre as dimensões do tubo e tensões verticais na base do tubo previstas e medidas após o enchimento – ensaio TG-CD

A Tabela 4.3 mostra um resumo com os desvios obtidos nas comparações das previsões com os valores medidos para os ensaios TG-SD e o ensaio TG-CD.

Tabela 4.3 - Resumo das diferenças obtidas nas comparações das previsões com as medições dos ensaios TG-CD e TG-SD

Ensaio		Métodos		
		Lawson (2008)	Plaut & Suherman (1998)	Guo <i>et al.</i> , (2014)
TG-CD	Altura (m)	0	4.5%	29.5%
	Largura da base (m)	13.51%	20.0%	37.3%
	Largura máxima (m)	9.09%	5.55	14.5%
	Área (m ²)	11.63%	9.30%	4.7%
	$\sigma_v/\gamma H$	2.08%	2.62%	-
TG-SD	Altura (m)	2.65%	0.2%	25.9%
	Largura da base (m)	13.98%	19.9%	37.4%
	Largura máxima (m)	8.11%	6.3%	15.4%
	Área (m ²)	12.04%	4.86%	3.9%
	$\sigma_v/\gamma H$	5.2%	1.5%	-

As forças de tração máximas e mínimas mobilizadas no tubo nos ensaios TG-CD e TG-SD são apresentadas na Tabela 4.4. As previsões de forças de tração por Plaut & Suherman (1998) e Guo *et al.*, (2014) para os ensaios TG-SD e TG-CD são também apresentados na Tabela 4.4. As forças de tração mobilizadas no ensaio TG-SD variaram entre 0.81 kN/m e 1.49 kN/m após o enchimento (Tabela 4.4) dependendo da localização considerada ao longo do perímetro do tubo. O método de Plaut & Suherman previu valores de 1.26 kN/m e 1.14 kN/m para a força de tração do geotêxtil nos ensaios TG-SD e TG-CD, respectivamente. Assim, as previsões por esse método ficaram mais próximas dos valores máximos medidos no geotêxtil, mas com desvios de 15.4% (TG-SD) e 23.5% (TG-CD). Por outro lado, Guo *et al.*,(2014) previram valores de 1.96 kN/m e 1.93 kN/m para a força de tração, sendo 31.5% e 29.5% maiores que o valor máximo medido durante o ensaio.

Tabela 4.4 - Forças de tração de geotêxteis mobilizadas (final de enchimento e final do ensaio) e previstas (final de enchimento).

Etapa	Alcance	TG-SD (kN/m)	TG-CD (kN/m)	TG-SD		TG-CD	
				Plaut & Suherman (kN/m)	Guo <i>et al.</i> (kN/m)	Plaut & Suherman (kN/m)	Guo <i>et al.</i> (kN/m)
Após enchimento	Máximo	1.49	1.49	1.26	1.96	1.14	1.93
	Mínimo	0.81	0.58				
Final do ensaio	Máximo	1.38	1.38				
	Mínimo	0.69	0.52				

f. Resistência não drenada do material de enchimento (S_u)

A análise da resistência ao cisalhamento do material retido dentro do tubo foi realizada por meio de ensaios de palheta para a obtenção da sua resistência não drenada (S_u) no final do ensaio.

Na Figura 4.38 mostram-se os valores de S_u obtidos em duas profundidades (65mm-P1 e 235mm-P2) no tubo TG-SD. Assim, para o ponto P1 (seção A-A') foi atingido o valor de S_u igual a 6,05 kPa, no entanto na profundidade correspondente ao ponto P2 foi de 2,18 kPa. Para a segunda seção (B-B'), localizada a 150 mm da extremidade do tubo, foram obtidos resultados de S_u de 7,52 kPa e 3,61 kPa para P1 e P2, respectivamente. Com isso, percebe-se uma diminuição da resistência (S_u) com a profundidade. Em condições em que a fundação possui uma capacidade drenante adequada, espera-se que a resistência do material retido no tubo aumente com a profundidade (Koh *et al.*, 2020). Porém, para as condições de ensaio desenvolvidas na pesquisa, a resistência não aumentou com a profundidade, pois a condição impermeável da fundação impediu a drenagem nas camadas inferiores.

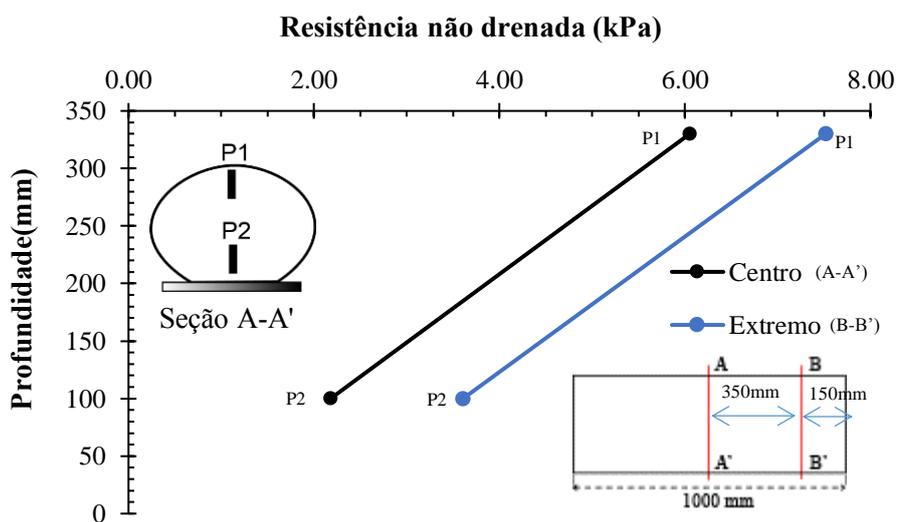


Figura 4.38 - Perfil de resistência do TG-SD

A variação da resistência (S_u) com a profundidade para o tubo TG-CD é mostrada na Figura 4.39. De forma similar ao acontecido no ensaio com o tubo TG-SD, são obtidos maiores valores no ponto mais superficial. No entanto, menores diferenças na resistência (S_u) foram obtidas entre as duas profundidades estudadas. Assim, pode-se verificar que o sistema de

drenagem interno contribuiu para uma menor diferença de resistência não drenada ao longo da vertical.

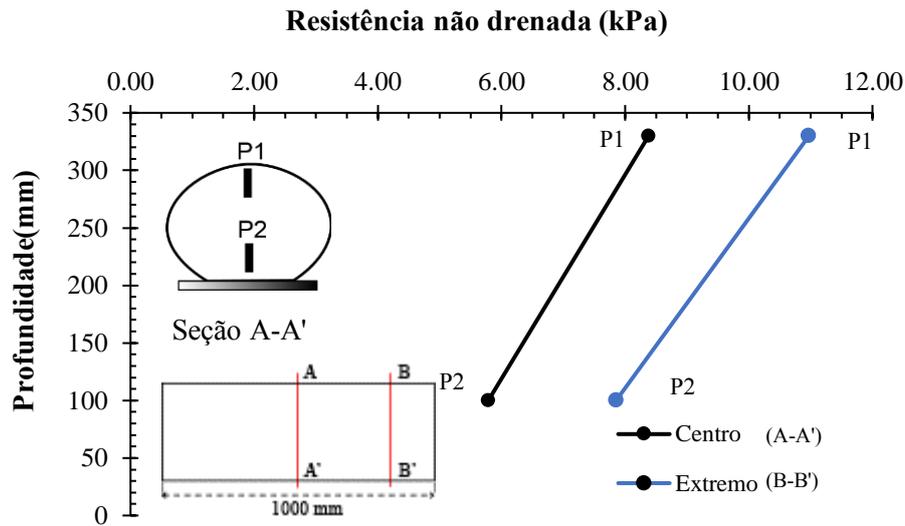


Figura 4.39 - Perfil de resistência do TG-CD

Na Figura 4.40 mostra-se a variação da umidade com a profundidade. Pode-se observar que para as amostras coletadas na superfície (ponto A) um menor teor de umidade foi atingido com valores médios variando de 64,76% (ensaio TG-CD) e 67,36% (ensaio TG-SD). Para a profundidade entre 188 e 190 mm (ponto B) foram registrados maiores teores com um valor médio maior no ensaio TG-SD de 76,26% sendo 4,22% maior que a umidade obtida no ensaio TG-CD. Dessa forma pode-se perceber que o sistema de drenagem no tubo TG-CD auxiliou na aceleração do desaguamento em relação ao tubo sem o sistema de drenagem (TG-SD).

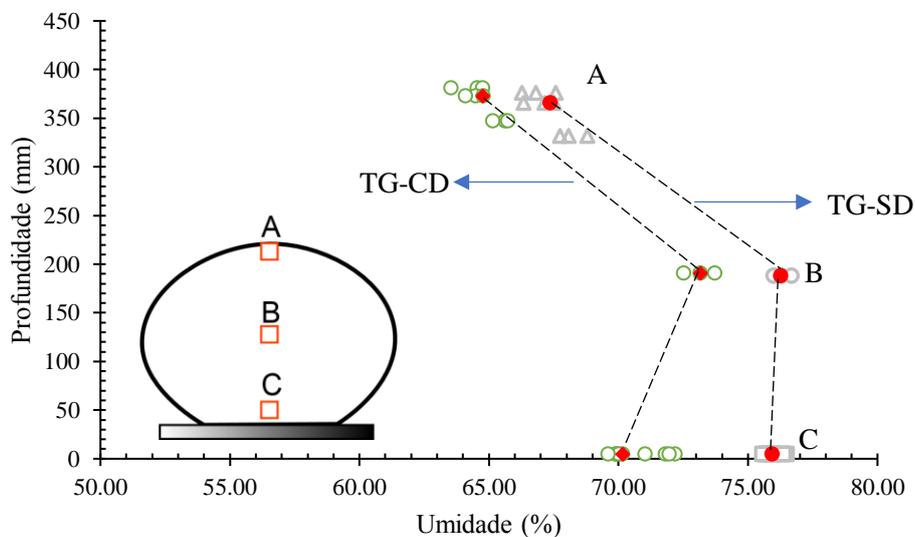


Figura 4.40 - Perfil de umidade no ensaio TG-CD e TG-SD.

g. Dimensões das partículas que passaram pelo geotêxtil

As partículas de solo que passaram pelo geotêxtil durante o processo de desaguamento nos ensaios TG-SD e TG-CD, principalmente nas primeiras horas de ensaio, foram coletadas para a obtenção de suas granulometrias. A Figura 4.41 mostra a distribuição granulométrica das partículas (sem o agente dispersante) que passaram pelo geotêxtil durante os ensaios, bem como a curva granulométrica das partículas do solo original. Observa-se pouca diferença na distribuição no material passando em cada ensaio. Além disso o valor máximo do diâmetro das partículas que passaram pelo geotêxtil (tomado como d_{95} , que é o diâmetro de partículas para o qual 95% das partículas restantes são menores) foi igual a 0.073 mm no ensaio TG-SD e 0.052 mm no ensaio TG-CD, os quais são valores menores que o tamanho da abertura de filtração do geotêxtil ($O_{95}=0,115$ mm, Tabela 3.1).

Cabe ressaltar que não se adicionou agente floculante à lama utilizada no ensaio. Por outro lado, este tipo de ensaio implica que a camada de geotêxtil seja submetida a tracionamento devido a pressões internas geradas pelo material retido. No entanto, Palmeira *et al.*, (2019) relataram pouca variação nos tamanhos de abertura de filtração de geotêxteis submetidos à tração sob condições de deformação plana.

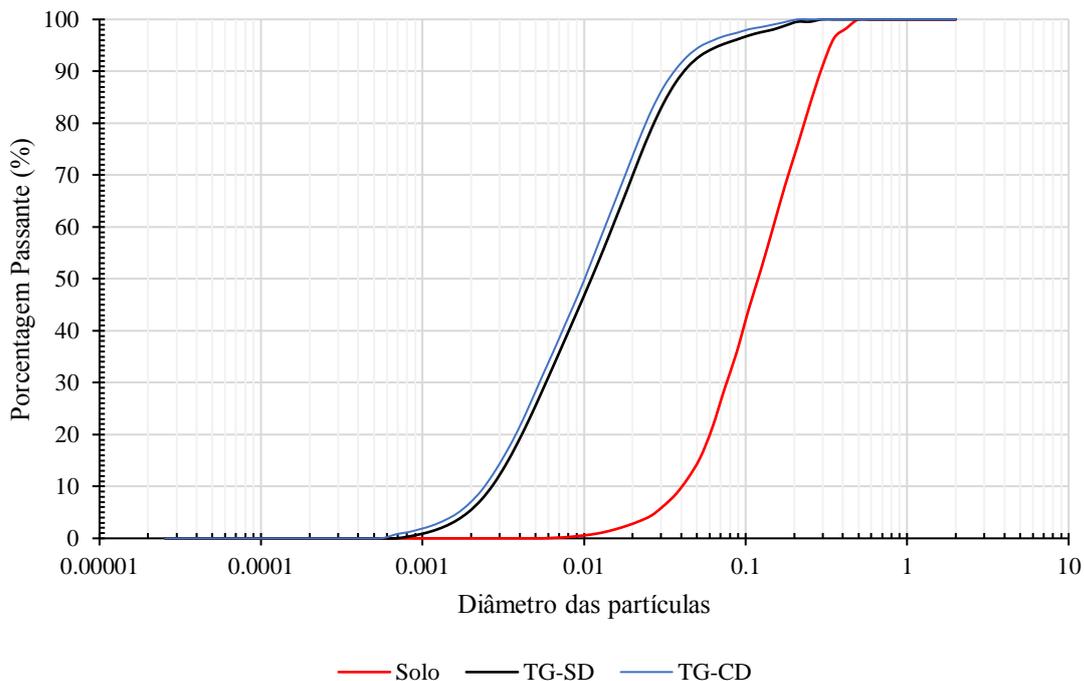


Figura 4.41 - Distribuição das partículas de solo que passaram pelo geotêxtil

A massa total do solo que passou pelo geotêxtil para o ensaio TG-SD foi de 6,06 g e 5,453 g no ensaio TG-CD. Portanto, o ensaio TG-SD apresentou um aumento de 11,1% na massa do solo passante. Em relação à área superficial total do tubo geotêxtil disponível para passagem de partículas, os valores obtidos foram de 1,72 g/m² para o ensaio TG-SD e 1,55 g/m² para o ensaio TG-CD.

4.2.3 COMPORTAMENTO DE TUBOS GEOTÊXTEIS EM CONFIGURAÇÃO EMPILHADA

O comportamento de tubos empilhados foi avaliado em termos de diferentes características pertinentes ao processo de desaguamento, tais como vazão de desaguamento, deformação do geotêxtil e variação das poropressões e tensões totais no material de enchimento. Para isso, são apresentados e analisados resultados na mudança da altura e do comportamento do material argiloso retido dentro do tubo em termos de tensões totais, poropressão e resistência não drenada.

a. Redução de volume e mudança na taxa de desaguamento

A variação de volume de água drenada na configuração empilhada é mostrada na Figura 4.42. O tubo TGE-01 e o tubo TGE-02 foram monitorados antes do enchimento do tubo TGE-03. Assim, na Figura 4.42 são apresentados os volumes de água acumulados de TGE-01, TGE-02 e TGE-03. Após finalizado o empilhamento com o TGE-03 nota-se um aumento significativo no volume de água drenada com o tempo, mostrando que houve um aumento no desaguamento pelo efeito da tensão gerada com o peso próprio do TGE-03.

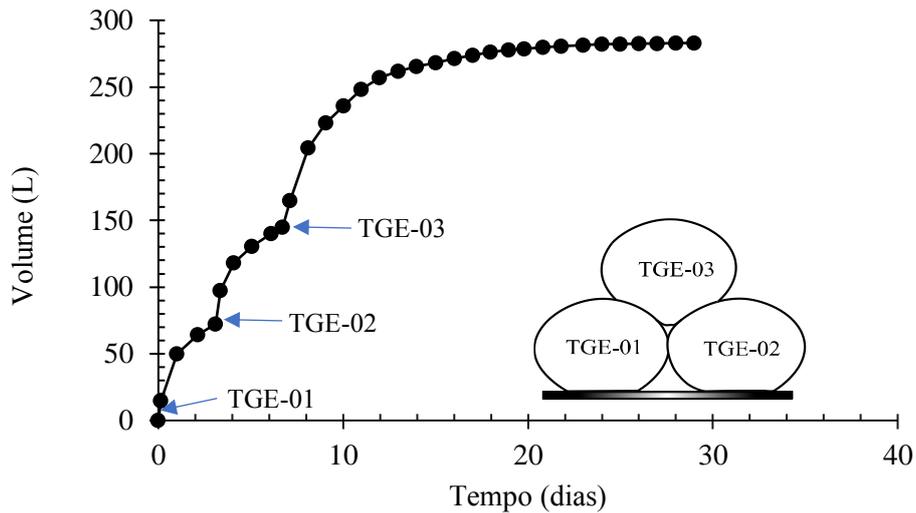


Figura 4.42 - Volume acumulado de água drenada no ensaio empilhado

Na Figura 4.43 mostra-se a variação da altura do tubo com o tempo ao longo do ensaio para o TGE-01. Assim, pode-se notar uma estabilização na altura principalmente na última semana de ensaio. No entanto, no final da primeira semana é notável um aumento na altura de 9% durante o processo de desaguamento, sendo este provocado pelo enchimento do TGE-03, que resultou em deformações em TGE-1.

A variação na altura de TGE-02 com o tempo é mostrada na Figura 4.44. Pode-se observar uma diminuição gradual na altura decorrente do processo de desaguamento. No entanto, como aconteceu no tubo TGE-01, um aumento na altura foi observado na primeira semana em consequência do enchimento de TGE-03. Percebe-se que nos últimos cinco dias de ensaio é evidenciado um comportamento estável na altura tanto de TGE-01 quanto de TGE-02.

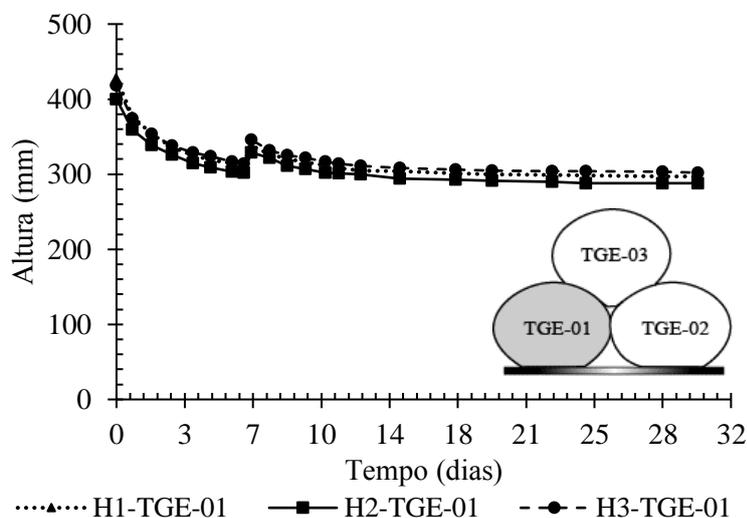


Figura 4.43 - Variação da altura do TGE-01

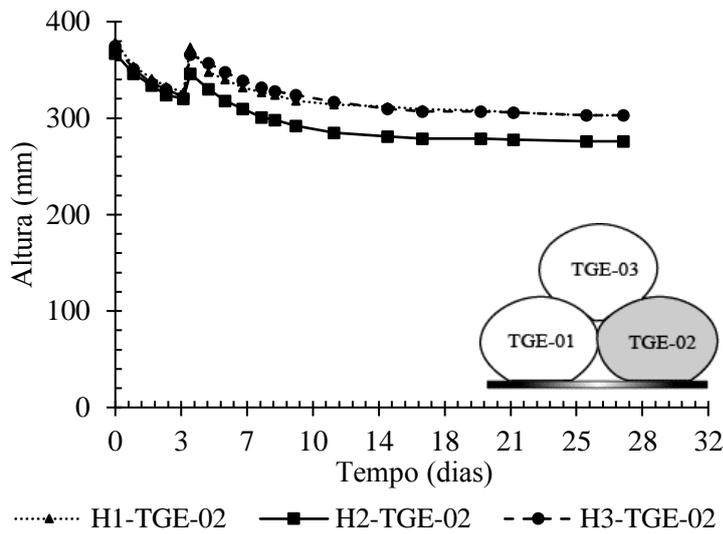


Figura 4.44 - Variação da altura do TGE-02

A vazão de desaguamento durante o ensaio foi obtida por meio do volume do efluente dos tubos de geotêxtil. Para tal, foi possível registrar a variação a partir do enchimento do TGE-01 até a finalização do empilhamento com o enchimento do TGE-03, como apresentado na Figura 4.45. Dessa forma, assim completado o empilhamento pôde-se observar a contribuição de cada tubo na vazão por 30 dias de ensaio. Percebe-se que com o passar dos dias a vazão diminui até atingir o valor de $3,99\text{E-}08$ L/s, isto se deve ao processo de consolidação das partículas de argila que inicialmente estavam em solução e com o passar do tempo se agruparam.

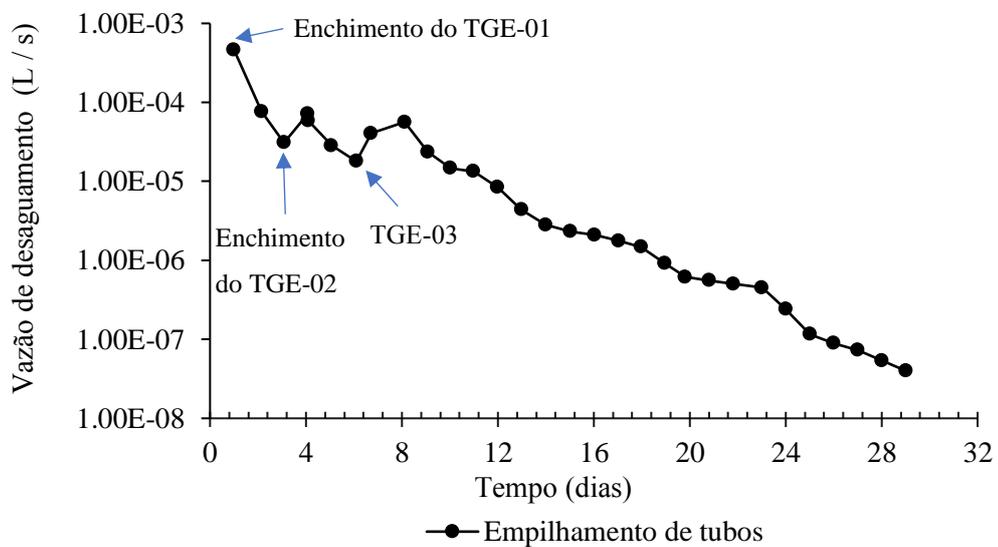


Figura 4.45 - Variação da taxa de desaguamento

b. Poropressões e tensões totais

A variação das poropressões na base do tubo com o tempo foram registradas para os ensaios TGE-01, TGE-02 e TGE-03 (Figura 4.46, Figura 4.47 e Figura 4.48). Na Figura 4.46 mostram-se os resultados obtidos para o TGE-01 com valores máximos de 5,45 kPa e 2,34 kPa registrados nos pontos P1P e P2P, respectivamente. Por outro lado, pode-se observar a influência do enchimento do TGE-03, pois um aumento nas poropressões é evidenciado no sétimo dia atingindo valores de 1,6 kPa e 2,4 kPa para os pontos P1P e P2P. Assim, o empilhamento do terceiro tubo provocou picos de poropressões na base do tubo TGE-01. Após o enchimento de TGE-03 é verificada uma redução das poropressões atingindo valores com uma tendência à estabilização na última semana de ensaio dentro da faixa de 0,24 e 0,52 kPa.

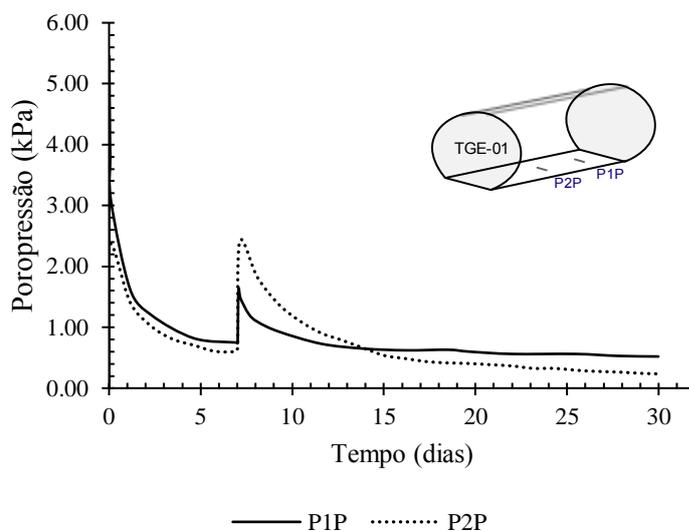


Figura 4.46 - Poropressões medidas no ensaio com empilhamento (TGE-01)

Os valores máximos de 5,39 kPa e 4,97 kPa foram registrados pelos transdutores de pressão P1P e P2P no tubo TGE-02 (Figura 4.47). Uma redução da poropressão pode ser observada após o enchimento, no entanto, valores de 6,52 kPa e 5,24 kPa foram registrados após quatro dias de ensaio, o que evidencia o efeito da instalação de TGE-03. Cabe ressaltar que o enchimento do TGE-03 ocorreu quatro dias após o final do enchimento do TGE-02. Contudo, após finalizado o enchimento do TGE-03 verifica-se também uma redução gradual das poropressões atingindo uma estabilização na última semana de ensaio para valores variando de 0,14 a 0,42 kPa.

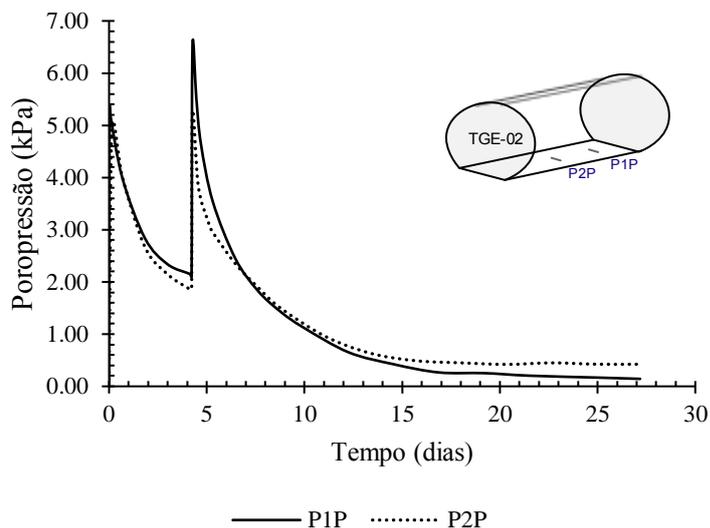


Figura 4.47 - Poropressões medidas no ensaio com empilhamento (TGE-02)

A Figura 4.48 mostra a variação da poropressão na base do tubo com o tempo para o ensaio do TGE-03. Novamente, os valores máximos foram registrados no início do estágio de enchimento, sendo eles de 6,96 kPa e 3,87 kPa nos pontos P1P e P2P (Figura 4.48). Nota-se que há uma diferença nos valores máximos após o processo de enchimento, sendo eles decorrente principalmente do efeito do jato da lama. No entanto, com o decorrer do ensaio é verificada uma redução nas poropressões com uma tendência à estabilização com valores entre 0,18 kPa e 0,47 kPa.

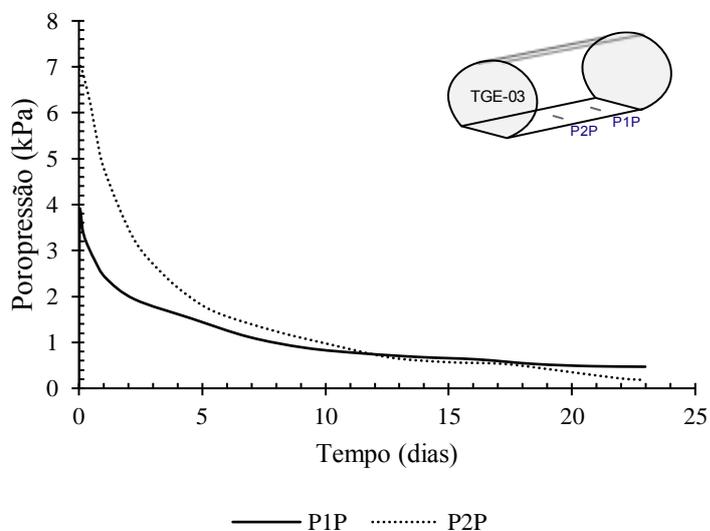


Figura 4.48 - Poropressões medidas no ensaio com empilhamento (TGE-03)

As variações nas tensões verticais totais normalizadas na base do tubo TGE-01 são apresentadas na Figura 4.49. Notam-se maiores tensões iniciais decorrentes do efeito da entrada da lama durante o processo de enchimento. No entanto, percebe-se um aumento abrupto no sétimo dia de ensaio devido ao enchimento do tubo TGE-03. Durante o processo de desaguamento nota-se uma redução nas tensões chegando a valores variando entre 1.33 e 1.40 no final do ensaio.

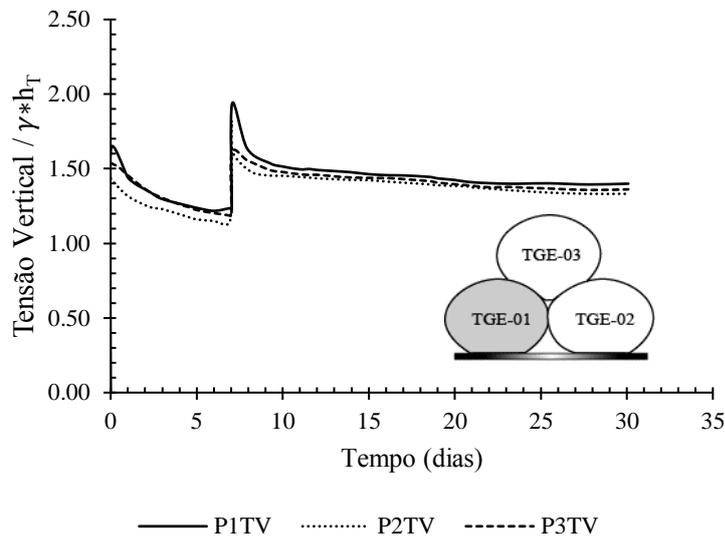


Figura 4.49 - Tensão total na base do tubo no ensaio TGE-01

Na Figura 4.50 mostra-se a variação da tensão vertical normalizada na base do tubo com o tempo para o ensaio TGE-02. Como aconteceu no ensaio TGE-01, maiores tensões verticais iniciais são consequência do processo de enchimento, causado pelo impacto do jato de lama nas células de tensão. Uma diminuição na tensão vertical total normalizada devido ao desaguamento pode ser notada ao longo do teste até atingirem-se valores entre 1,26 e 1,31.

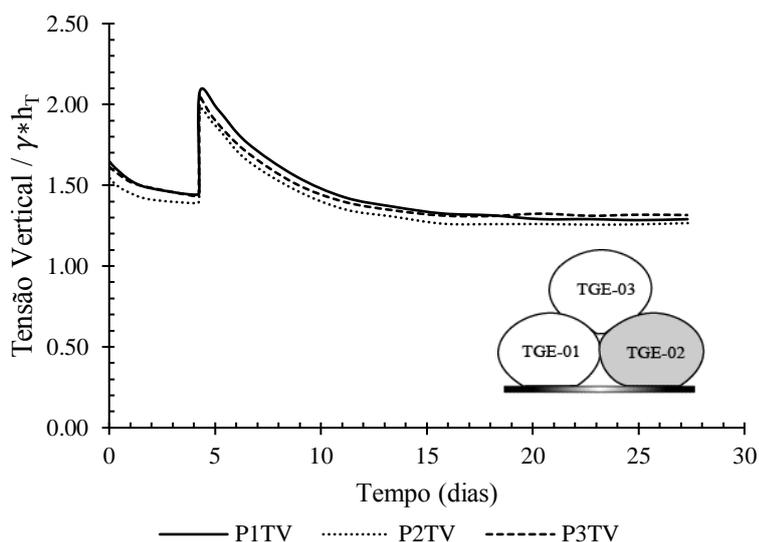


Figura 4.50 - Tensão total na base do tubo no ensaio TGE-02

c. Deformações no geotêxtil

As variações de deformação no geotêxtil ao longo do perímetro do tubo no final do enchimento para os tubos TGE-01, TGE-02 e TGE-03 são apresentadas na Figura 4.51. A máxima deformação de tração foi atingida entre as seções I e III localizadas próximas da coroa do tubo e diminuindo em direção à base do tubo. Assim, considerando a seção I, a maior deformação de 14% foi atingida no TGE-01, e de 10% para o TGE-02. Menores deformações no tubo TGE-02 podem ter sido devido ao mesmo encostar em TGE-01 durante o enchimento.

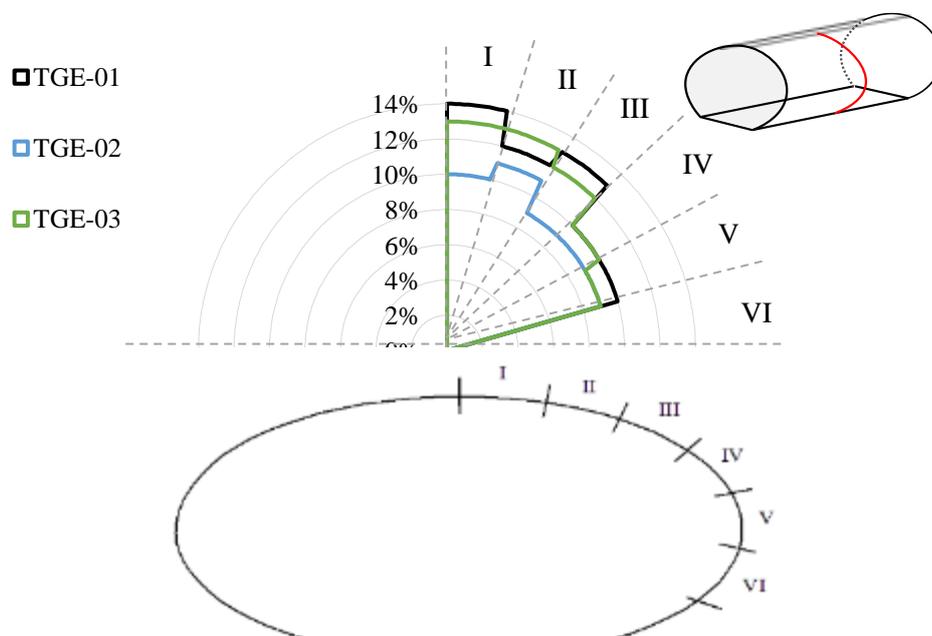


Figura 4.51 - Deformação do TGE-01, TGE-02 e TGE-03 após o enchimento

Após o enchimento do TGE-03 foram registrados aumentos nas deformações em TGE-01 e TGE-02 (Figura 4.52). Deve-se atentar que as faixas de medição nesta etapa foram realizadas a partir da seção II pois parte do TGE-03 encontrava-se posicionado acima da faixa I. Assim, um aumento na deformação de 7,7% foi registrado no TGE-01 e de 8,3% no TGE-02.

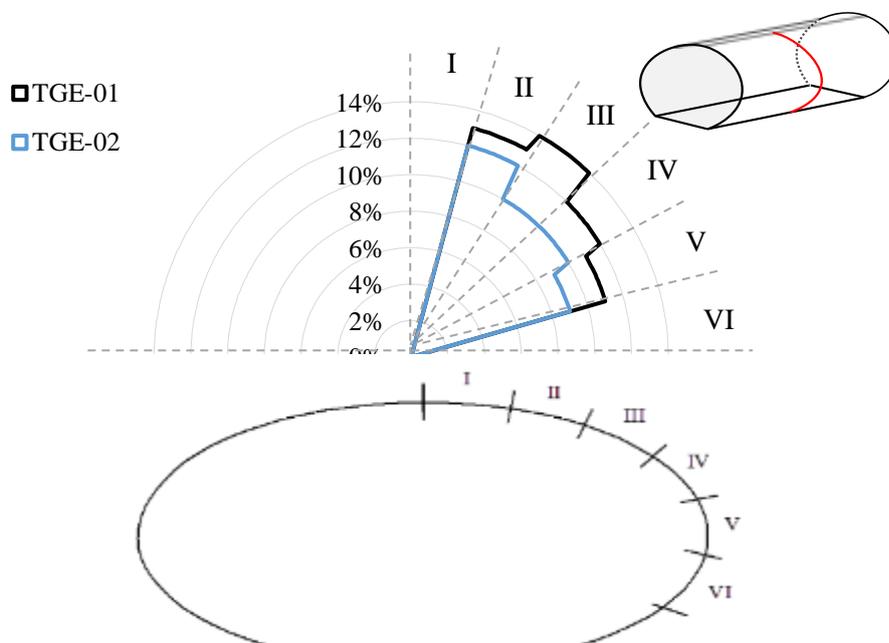


Figura 4.52 - Deformação do TGE-01 e TGE-02 após o enchimento de TGE-03

No final do ensaio (Figura 4.53), percebe-se que houve uma redução da deformação em todas as faixas de medição devido ao desagramento. Para o ensaio TGE-01 observou-se uma deformação no final do ensaio de 11% na seção II do tubo, e 8% na seção V, próxima à base. No ensaio TG-02 registrou uma deformação final de 10% na seção II e 6% próximo à base (seção V). No entanto, o TGE-03 apresentou menor redução no final do ensaio na faixa de medição próxima da coroa do tubo com uma deformação final de 12,5%, representando 4% de redução em relação ao valor máximo inicial.

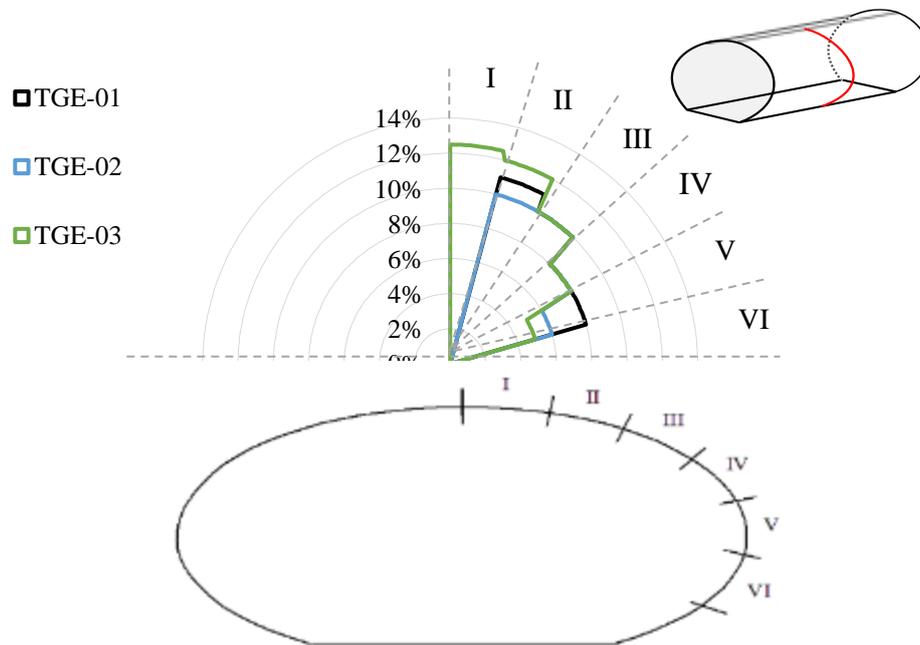


Figura 4.53 - Deformações em TGE-01, TGE-02 e TGE-03 no final do ensaio

d. Resistência não drenada do material de enchimento (S_u)

Na Figura 4.54 mostra-se o perfil de variação de S_u com a profundidade para os tubos TGE-01, TGE-02 e TGE-03. No tubo TGE-01, pode ser observado no ponto de ensaio localizado na parte superior (P1) atingiu-se o valor de resistência não drenada de 3,32 kPa, no entanto, o menor valor obtido foi de 2,17 kPa, na base do tubo (ponto P3). Um comportamento similar percebe-se no TGE-02 com valores menores de resistência com a profundidade, sendo o maior valor apresentado de 3,10 kPa (ponto P1) e 2,00 kPa próximo da base (ponto P3). Ademais, o TGE-03 apresentou maiores valores de resistência com a profundidade ao comparar com os outros tubos. Apesar da diferença da resistência entre os tubos não ser tão significativa pode ser observado a capacidade drenante entre eles, nesse caso a base conformada pelos tubos TGE-01 e TGE-02 receberam a saída de água do TG-03 refletindo na diminuição da resistência e mostrando-se comportamento de base impermeável, consequentemente aumentando a resistência do TG-03.

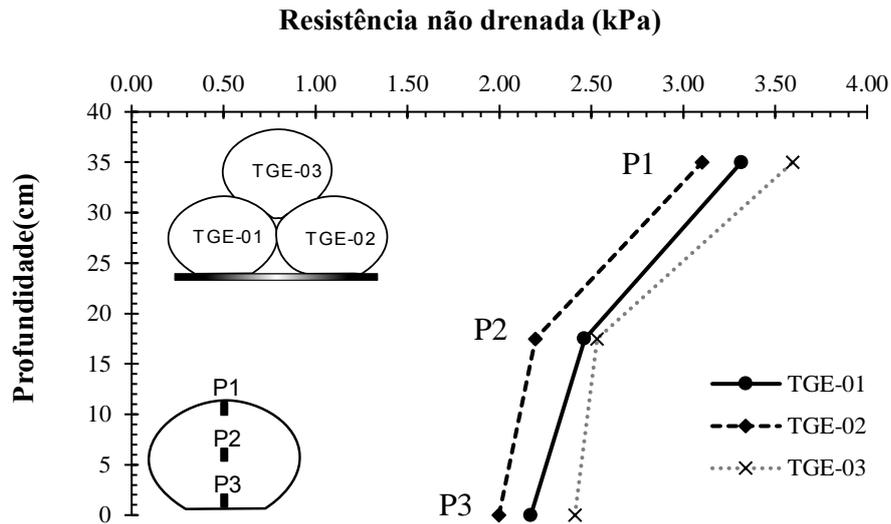


Figura 4.54 - Perfil de resistência do TGE-01, TGE-02 e TGE-03

e. Dimensões das partículas que passaram pelo geotêxtil

A Figura 4.55 mostra a curva granulométrica das partículas do solo original, bem como a distribuição granulométrica das partículas (sem o agente dispersante) que passaram pelo geotêxtil. A figura mostra que o valor máximo do diâmetro das partículas que passaram pelo geotêxtil (tomado como d_{95}) foi igual a 0,088 mm no ensaio empilhado, que é menor que a abertura de filtração do geotêxtil ($O_{95} = 0,115$ mm, Tabela 3.1).

Na configuração empilhada é provocado um aumento das forças mobilizadas no geotêxtil envolvente nos tubos localizados na base. No entanto, foi verificado que apesar disso não houve grande perda de material fino, pois a massa total do solo que passou pelo geotêxtil foi de 10,93g. Dessa forma verifica-se que a função de retenção de material fino não foi comprometida ao longo do ensaio.

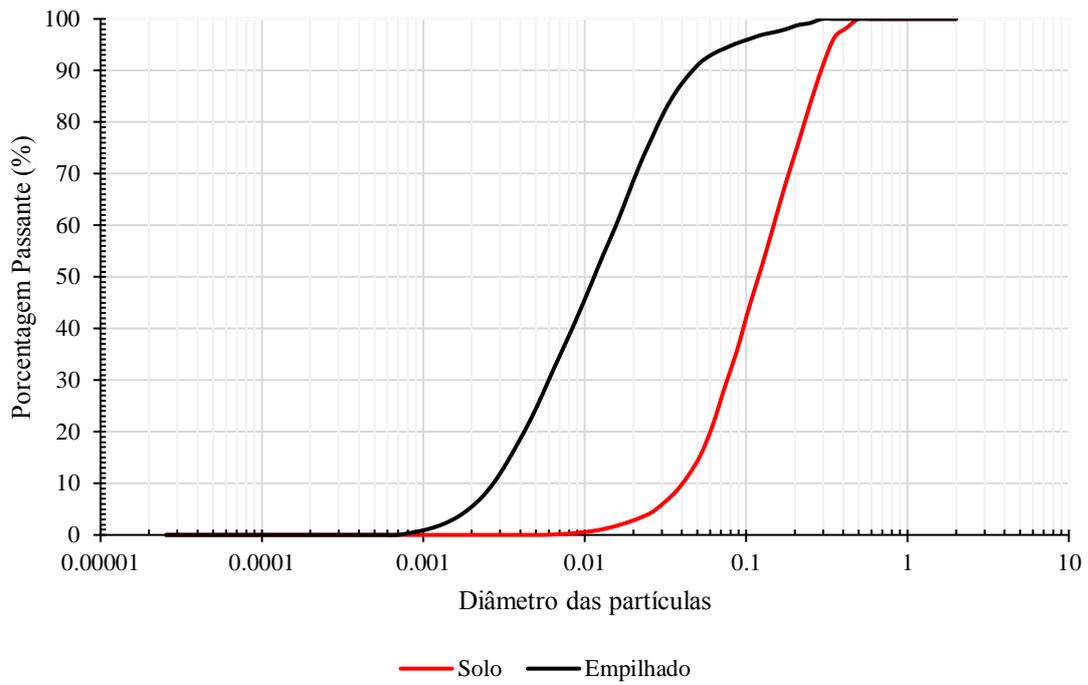


Figura 4.55 - Distribuição das partículas de solo que passaram pelo geotêxtil

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

Esta pesquisa estudou o comportamento de tubos geotêxteis por meio de ensaios de laboratório. Foram desenvolvidos diferentes processos de enchimentos no estudo, sendo com três etapas de enchimento, uma única etapa de enchimento, utilização de um sistema de drenagem no interior do tubo e enchimento em configuração empilhada. Um equipamento de grande porte foi utilizado para simular as etapas de enchimento e desaguamento dos tubos e a instrumentação geotécnica forneceu informações relevantes para entender o comportamento dos tubos. As principais conclusões obtidas neste estudo são resumidas a seguir.

O uso da mistura de solo arenoso-água no enchimento dos tubos permitiu verificar o desempenho do equipamento assim como da instrumentação utilizada para o estudo dos tubos, com resultados satisfatórios no desenvolvimento da pesquisa. Desta forma, nos ensaios TGA-02 e TGA-03 observou-se uma rápida diminuição das poropressões após cada enchimento verificado com a saída da água livre do sistema em um intervalo curto de tempo (12 horas). Por outro lado, as poropressões aferidas com os valores obtidos pelo sistema de coluna de água apresentaram uma semelhança na resposta entre os dois sistemas de medida de poropressão.

A alta permeabilidade do solo arenoso foi verificada nos ensaios TGA-02 e TGA-03, pois as tensões verticais no interior dos tubos apresentaram uma rápida estabilização após o final do processo de enchimento, o que também evidenciou a capacidade drenante do geotêxtil utilizado. Por outro lado, as deformações de tração máximas foram verificadas na crista do tubo nos ensaios TGA-02 e TGA-03 com valores maiores para o ensaio TGA-02 face ao acúmulo de material no setor central do tubo devido ao uso de uma única entrada no processo de enchimento.

Para os ensaios utilizando solo argiloso e comparando os ensaios TG-3FE e TG-SD tem-se que a utilização de três estágios de enchimento (TG-3FE) aumentou significativamente a altura e o volume do tubo ao final do ensaio quando comparado no ensaio TG-SD. As maiores deformações do geotêxtil foram alcançadas no ensaio com três estágios de enchimento, com a deformação máxima ocorrendo na crista do tubo em ambos os tipos de ensaios. O uso de múltiplos estágios de enchimento foi mais eficiente em relação à altura final do tubo e capacidade de armazenamento, apesar de levar mais tempo para o enchimento do tubo.

O geotêxtil utilizado foi eficiente no desaguamento da lama assim como na redução das tensões e poropressões no interior do tubo. Partículas menores que o tamanho da abertura de

filtração do geotêxtil foram capazes de passar através do geotêxtil, mas em quantidades baixas, mas maiores em tamanho e em quantidade no ensaio com três estágios de enchimento.

Nas comparações entre medições e previsões por métodos disponíveis na literatura, foram observados desvios que variaram de 4,5% a 37,3% entre os valores previstos e medidos, dependendo do parâmetro do tubo analisado e do método considerado. Previsões mais precisas foram obtidas para a área da seção transversal do tubo (desvios entre 4,7% e 9,3%) e previsões com maior desvio para a largura da base do tubo (desvios entre 13,5% e 37,3%). Desvios entre a altura do tubo prevista e medida variaram entre 4,5% e 29,5%, dependendo do método utilizado. Desvios menores (2,1% e 2,6%) foram obtidos para as previsões de tensão vertical total na base do tubo. Desvios de 15,4% e 31,5% foram obtidos para as previsões das forças de tração do geotêxtil. De maneira geral, as relações apresentadas por Lawson (2008) forneceram as melhores estimativas do comportamento do tubo para as condições dos ensaios realizados.

Considerando uma fronteira drenante central no ensaio TG-CD observou-se que a estabilização nas leituras de quantidade de volume desaguado ocorreu com antecipação de quatro dias quando comparado com os resultados obtidos do ensaio TG-SD. A diferença na variação da altura foi notavelmente reduzida após 2 semanas no ensaio TG-CD, no entanto, para o ensaio TG-SD, foi atingida a partir do final da terceira semana, o que mostra a influência do sistema utilizado na aceleração do desaguamento. Verificou-se a eficiência no geotêxtil utilizado no desaguamento da lama bem como na redução das poropressões e tensões no material de preenchimento. Percebeu-se uma considerável redução das poropressões e tensões na primeira semana, sendo mais evidente no ensaio TG-CD. As maiores deformações no geotêxtil foram atingidas na crista do tubo, diminuindo na direção da base em ambos os ensaios. Partículas menores que o tamanho da abertura de filtração do geotêxtil foram capazes de passar através do geotêxtil, mas em quantidades baixas, mas maiores em tamanho e em quantidade no ensaio sem sistema interno de drenagem (TG-SD).

Com respeito a resistência não drenada no final dos ensaios TG-CD e TG-SD verificaram-se maiores valores de resistência na profundidade de 65 mm em ambos os ensaios, sendo maiores para o ensaio TG-CD. A condição impermeável na base dos tubos conduz a resistências mais baixas próximas da base a uma profundidade de 235 mm e no centro do tubo. No entanto, maiores valores de resistência foram obtidos no ensaio TG-CD, evidenciando o efeito no uso do sistema interno de drenagem.

A eficiência no desaguamento foi investigada na configuração empilhada por meio dos tubos TGE-01, TGE-02 e TGE-03. A saída da água do sistema após os enchimentos aconteceram sem interrupção com uma constante variação da altura dos tubos até atingir a

estabilidade. Maiores deformações no geotêxtil foram atingidas nos trechos próximos à crista dos tubos com um aumento nos tubos TGE-01 e TGE-02 após o enchimento do TGE-03. Como nos casos anteriores, partículas menores que o tamanho da abertura de filtração do geotêxtil foram capazes de passar através do geotêxtil, mas em quantidades muito pequenas, após o enchimento do tubo TGE-01 e TGE-02, como aconteceu nos ensaios TG-SD e TG-CD. No entanto, após completar o empilhamento com o enchimento do TGE-03 a quantidade de partículas finas atravessando o geotêxtil foi mínima, visualmente imperceptível.

A resistência não drenada na configuração empilhada resultou em uma diminuição da resistência com a profundidade. Para o ensaio TGE-03 foram observadas maiores resistências comparadas com os ensaios TGE-01 e TGE-02. Apesar de não serem tão significativas, isso mostra a influência ou contribuição dos tubos posicionados na base no processo de desaguamento.

Os resultados obtidos no estudo aqui descrito mostraram a eficiência da utilização de tubos geotêxteis para o desaguamento de lamas e a importância de verificar o comportamento do geotêxtil não tecido tanto na condição empilhada quanto na condição isolada. No entanto, mais pesquisas são necessárias, principalmente para o desenvolvimento de métodos para prever o comportamento de tubos geotêxteis submetidos a múltiplos estágios de enchimento e em condições de empilhamento.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para dar continuidade ao entendimento do comportamento de tubos de geotêxtil propõem-se as seguintes pesquisas futuras:

- Estudar o comportamento de tubos de geotêxteis preenchidos sobre uma base permeável a fim de verificar conferir possíveis diferenças no desaguamento de materiais finos;
- Estudar a deformação de tubos em condição isolada e empilhada utilizando outros tipos de geotêxteis e com diâmetros maiores;
- Avaliar as propriedades de resistência do material retido dentro dos tubos após serem submetidos ao efeito de carregamentos sísmicos;
- Aumentar a quantidade de tubos na condição empilhada para diferentes arranjos visando avaliar as condições dos tubos inferiores;
- Realizar simulações numéricas das condições de ensaio desenvolvidas para entender melhor e complementar o entendimento do comportamento dos tubos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1990). Solo-Ensaio de palheta in situ. NBR 10905: Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro, RJ, 9 p.
- ABNT (2013). Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga. NBR ISO 10319. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 11p.
- Alvarez, E., Rubio, R. & Ricalde, H. (2007). Beach restoration with geotextile tubes as submerged breakwaters in. *Geotextiles and Geomembranes*, 25: 233–241.
- Ardila, M. A. A., Souza, S.T., Silva, J.L., Valentin, C.A. & Dantas, A. B. (2020). Geotextile Tube Dewatering Performance Assessment: An Experimental Study of Sludge Dewatering Generated at a Water Treatment Plant. *Sustainability* 2020, 12, 8129; doi:10.3390/su12198129.
- ASTM, (2016). Standard test methods for laboratory miniature vane shear test for saturated fined grained clayey soil. American Society for Testing and Materials D4648/D4648M-16, 7p.
- Berilgen, S. A. & Bulut, B. T. (2015). Laboratory investigations for dewatering of golden horn dredged sludge with geotextile tubes. *Marine Georesources & Geotechnology*, DOI: 10.1081/106411X.2015.1068894.
- Bhatia, S. K., Smith, J. L. & Christopher, B. R. (1996). Geotextile characterization and pore-size distribution: Past III. Comparison of methods and application to design. *Geosynthetics International*. 1996, Vol. 3, No.3.
- Burgos, J.F. (2016). Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM272/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149 p.
- Bussièrre, B. (2007). Colloquium 2004: Hydro-geotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Can. Geotech. J.*, Vol. 44, No. 9, pp. 1019–1052.
- Cantré, S. & Saathoff, F. (2011). Design method for geotextile tubes considering strain-formulation and verification by laboratory test using photogrammetry. *Geotextile and Geomembranes*, 29 (2011) 201-210.
- Cantré, S. (2002). Geotextile tubes-analytical design aspects. *Geotextile and Geomembranes*, 20 (2002) 305-319.
- Castro, N. B, Melo, L. C. & Escobar, L. G. (2008). Environmental integrated solution for septic tank sludge and landfill leachate using geotextile tubes dewatering technology. *Proceedings of the 1st Pan American Geosynthetics Conference*, Cancun, Mexico, IFAI, pp. 419-424.
- Driussi, C. & Jansz, J. (2006). Technological options for waste minimization in the mining industry. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 14, No. 8, pp. 682–688.
- Elias, T., Geetha, T. & Shirlal, K.G. (2022). Effect of armour unit layers and placement mode in the determination of stability of geotextile sand container (GSC) breakwaters. *Geotextiles and Geomembranes* 50 (2022) 444–454.

- Elias, T., Shirlal, K G. & Kajal, E.V. (2021). Physical model studies on damage and stability analysis of breakwaters armoured with geotextile sand containers. *Geotextiles and Geomembranes* 49 (2021) 604–618.
- El-Shall, H. & Zhang, P. (2004). Process for dewatering and utilization of mining wastes. *Minerals and Engineering*. 17 (2004) 269-277.
- Gao, X., Guo, W., Ren, Y. & Zeng, W. (2022). Numerical analysis of a double layer rubber dam. *Geotextiles and Geomembranes* 50 (2022) 249–261.
- Ghavanloo, E., & Maneshi, M. A. (2018). Analysis of Air- and Liquid-Filled Heavy Geomembrane Tubes with Internal Restraint Baffles. *Journal of Engineering Mechanics*, 2018, 144(5): 04018019.
- Górniak, J., Villard, P. & Delmas, P. (2016). Coupled discrete and finite-element modelling of geosynthetic tubes filled with granular material. *Geosynthetics International*, 2016, 23 (5).
- Górniak, J., Villard, P., Barral, C., Delmas, P. & Watn, A. (2016). Experimental and analytical studies of geosynthetics tubes filled with expanded clay lightweight aggregate. *Geosynthetics International*, 2015, 22, (3).
- Guerdat, T. C., Losordo, T. M., DeLong, D. P. & Jones, R. D. (2013). An evaluation of solid waste capture from recirculating aquaculture systems using a geotextile bag system with a flocculant-aid. *Aquacultural Engineering* 54 (2013) 1–8.
- Guimarães, M. G. A., Urashima, D. C. & Vidal, D. M. (2014). Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems. *Geosynthetics International*, 2014, 21, No. 5.
- Guo, W. & Chu, J. (2016). Model test and parameters studies o two-layer geomembrane tubes. *Geosynthetics International*, 2016, 23 (4).
- Guo, W., Chu, J. & Yan, S. (2011). Effect of subgrade soil stiffness on the design of geosynthetic tube. *Geotextile and Geomembranes*, 29 (2011) 277-284.
- Guo, W., Chu, J. & Yan, S. (2013). Deformation of slurry filled permeable geosynthetic tubes. *Geo-Congress 2013* © ASCE 2013.
- Guo, W., Chu, J. & Yan, S. (2015). Simplified analytical solution for geosynthetic tube resting on deformable foundation soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 43 (2015) 432-439.
- Guo, W., Chu, J., Nie, W. & Yan, S. (2014). A simplified method for design of geosynthetic tubes. *Geotextiles and Geomembranes*, 42 (2014) 421-427.
- Hamad, F., Wieckowski, Z., & Moormann, C. (2017). Interaction of fluid-solid-geomembrane by the material point method. *Computers and Geotechnics*. 81 (2017) 112-124.
- Hornsey, W.P., Scheirs, J., Gates, W. P. & Bouazza, A. (2010). The impact of mining solutions/liquors on geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes* 28 (2010) 191-198.
- Johnson, S. L., Wright, A. H., (2003). Mine void water resource issues in Western Australia: Western Australia, Water and Rivers Commission, Hydrogeological Record Series, Report HG 9, pp. 1–93.
- Karadogan, U. K., Cevikbilen, G., Korkut, S., Pasaoglu, M. E. & Teymur, B. (2021). Dewatering of Golden horn sludge with geotextile tuve and determination of optimum operating conditions: A novel approach. *Marine Georesources & Geotechnology*. DOI: 10.1080/1064119X.2021.1938303.

- Karadogan, U. K., Korkut, S., Cevikbilen, G., Teymur, B. & Koyuncu, I. (2021). Evaluation of beneficial of polyacrylamide use dewatering of dredged sludge obtained from golden horn. *Marine Georesources & Geotechnology*. DOI: 10.1080/1064119X.2020.1780526.
- Kebel, M.T. Van, Breytenbach, M. & Wilke, M. (2016). Common practice and innovations in talings dams using geosynthetic tubes. International Symposium on “Appropriate technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries”, Johannesburg, South Africa, 18 May 2016, 29–37.
- Kebel, M.T., Breytenbach, M. & Wilke, M. (2016) Common practice and innovations in tailings dams using geosynthetic tubes. International Symposium on “Appropriate technology to ensure proper development, operation and maintenance of dams in developing countries”, Johannesburg, South Africa, 18 May 2016, 29-37.
- Khajenoori, L., Wright, G. & Crapper, M. (2021). Laboratory Investigation of Geobag Revetment Performance in Rivers. *Geosciences* 2021,11,304. <https://doi.org/10.3390/geosciences11080304>.
- Kim, H. J., Park, T. W., Dinoy, P. R., Kim, H. S. and Kim, H. J. (2018). Design and consolidation analysis of geotextile tubes for the Saemangeum project in Korea. *Geosynthetics International*, 25, No. 5, 507–524.[<https://doi.org/10.1680/jgein.18.00015>]
- Kim, H.J. & Dinoy, P.R. (2021). Two-dimensional consolidation analysis of geotextile tubes filled with ne-grained material. *Geotextiles and Geomembranes*, 49 (2021) 1149–1164.
- Kim, H.J., Dinoy, P.R. & Kim, H.S. (2020). Tension force analysis of geotextile tubes by half cross-section test. *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 48, Issue 3, June 2020, Pages 243-256.
- Kim, H.J., Won, M.S. & Jamin, J.C (2015). Finite-element analysis on the stability of geotextile tube-reinforced embankments under scouring. *International Journal of Geomechanics*, 2015, 15(2).
- Kim, H.J., Won, M.S., Jamin, J.C & Joo, J.H (2016b). Numerical and field test verifications for the deformation behavior of geotextile tubes considering 1D and areal strain. *Geotextiles and Geomembranes*, 44 (2016) 209-218.
- Kim, H.J., Won, M.S., Lee, K.H., & Jamin, J.C (2016a). Model Test on Dredged Soil-Filled Geocontainers used as containment dikes for the Saemangeum reclamation project in South Korea. *International Journal of Geomechanics*, 2016, 16 (2).
- Kim, M., Filtz, G.M., & Plaut, R.H. (2005a). Two-chambered water-filled geomembrane tubes used as water barrires: experiments and analysis. *Geosynthetics International*, 2005, 12, No.3.
- Kim, M., Moler, M., Freeman, M., Filz, G. M. & Plaut, R. H. (2005b). Stacked geomembrane tubes for flood control: experiments and analysis. *Geosynthetics International*, 2005, 12, No. 5.
- Koh, J.W., Chew S.H., Chua K.E., Yim H.M.A., Gng Z.X., (2020). Effect of construction sequence on the performance of geotextile tubes in a containment bund. *International Journal of GEOMATE*, Issue 74, pp.1-7.
- Koppe, J.C. (2020). Lessons learned from the two Major Tailings Dam Accidents In Brazil. *Mine Water and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00722-6>.
- Lawson, C. R. (2008). Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynthetics International*, 2008, 15, No. 6.

- Lee, E. C. & Douglas, R.S. (2012). Geotextile tubes as submerged dykes for shoreline management in Malaysia. *Geotextiles and Geomembranes* 30 (2012) 8-15.
- Lee, S. C., Hashim, R., Motamedi, S. & Song, K. (2014). Utilization of geotextile tube for sandy and muddy coastal management: A review. *The Scientific World Journal*. Volume 2014, Article ID 494020, 9 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/494020>.
- Leshchinsky, D., Leshchinsky, O., Ling, I.H. & Gilbert, P.A. (1996). Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: some design aspects. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122 (8).
- Liu, G.S. & Silvester, R. (1977). Sand sausages for beach defence work. 6th Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference Adelaide, Australia, 5-9 December 1977.
- Lottermoser, B. (2007). *Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts*. Springer, 304 p.
- Luo, S., Liu, Y., Jin, R., Zhang, J. & Wei, W. (2016). A guide to coastal management: Benefits and lessons learned of beach nourishment practices in China over the past two decades. *Ocean & Coastal Management* 134 (2016) 207-215.
- Malík, J. & Sysala, S. (2011). Analysis of geosynthetic tubes filled with several liquids with different densities. *Geomembranes and Geotextiles*, 29 (2011) 249-256.
- Malík, J. (2009). Some problems connected with 2D modeling of geosynthetic tubes. *Nonlinear Analysis: Real World Applications* 10 (2009) 810-823.
- Maurer, B.W., Gustafson, A.C., Bhatia, S.K., & Palomino, A.M. (2012). Geotextile dewatering of flocculated, fiber reinforced fly-ash slurry. *Fuel* 97 (2012) 411–417.
- Moo-Young, H.K., Gaffney, D. A. & Mo, X. (2002). Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile tubes. *Geotextiles & Geomembranes*. 20 (2002) 289-303.
- Morais, F. 2020. Performance of a drained stacking with geotextile tubes - New proposal for disposal of mining fine waste, MSc. Thesis. Federal University of Minas Gerais, Dept. of Transport and Geotechnical Engineering, Belo Horizonte, Brazil. (in progress) (in Portuguese).
- Müller, M., Guanaes, E. & Vidal, D. (2018). Coastal protection jetty with geotextile tubes core and artificial beach creation in Tocopilla, Chile. XV^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil. La Rochelle, 29 au 31 mai 2018. DOI:10.5150/jngcgc.2018.055 © Editions Paralia CFL disponible en ligne – <http://www.paralia.fr> – available online.
- Muthukumar, A.E. & Ilamparuthi, K. (2006). Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering. *Geotextiles and Geomembranes* 24 (2006) 210–219.
- Newman, P., Hodgson, M. & Rosselot, E. (2004). The disposal of tailings and minewater sludge using geotextile dewatering techniques. *Minerals Engineering*, 17: 115–121.
- Nishold, S. S. P., Sundaravadivelu, R., & Saha, N. (2018). Geotextile tube and gabion armoured seawall for coastal protection an alternative. *PIANC-World Congress Panama City, Panama 2018*.
- Oh, Y.I & Shin, E.C. (2006). Using submerged geotextile tubes in the protection of the Korean shore. *Coastal Engineering*, 53: 879-895.
- Ortiz, R.N., Junior, O.S. & Ladchumanandasivam, R. (2003). Tubos de geotêxtil aplicados a obras de defesa costeira. II Congresso sobre planejamento e gestão das zonas costeiras.

- Palmeira, E.M., Melo, D.L.A., & Moraes-Filho, I. (2019). Geotextile filtration opening size under tension and confinement. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 47, p. 566-576, doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.02.004
- Palmerton, J. B. (2002). Distinct element modeling of geosynthetic fabric containers. *Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics*, Nice, France, vol. 3, pp. 1021–1024.
- Patankar, N., Joseph, D., Wang, J., Barree, R., Conway, M. & Asadi, M. (2002). Power law correlations for sediment transport in pressure driven channel flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 28, No. 8, 1269–1292.
- Pavanello, P., Tognolo, D., Carrubba, P. & Frigo, L. (2019). Numerical Analysis of Stacked Geo-Tubes. *Geotechnical Research for Land Protection and Development* pp 225–234.
- Pavanello, P., Verza, E. & Carrubba, P. (2019). Numerical analysis of a geo-tube subjected to seismic soil liquefaction. *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions – Silvestri & Moraci (Eds)*. ISBN 978-0-367-14328-2.
- Pilarczyk, K.W. (1996). Critical review of geosystems in hydraulic and coastal engineering applications. Rijkswaterstaat, Road and Hydraulic Engineering Division (DWW), Delft, the Netherlands.
- Plaut, R.H. & Filz, G.M. (2008). Deformations and tensions in single-layer and stacked geosynthetic tubes. *The first Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition 2-5 march 2008, Cancun, Mexico*.
- Plaut, R.H. & Klusman, C.R. (1999). Two-dimensional analysis of stacked geosynthetic tubes on deformable foundations. *Thin-walled structures*, 34 (1999) 179-194.
- Plaut, R.H. & Suherman, S. (1998). Two-dimensional analysis of geosynthetic tubes. *Acta Mechanica*, 129,207-218 (1998).
- Ramsdell, R. C., Miedema, S. A. & Talmon, A. M. (2011). Hydraulic transport of sand/shell mixtures. *Proceedings of AMSE 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 6, 533–547, <http://dx.doi.org/10.1115/OMAE2011-49695>.
- Ratnayesuraj, C. R. and Bhatia, S. K. (2018). Testing and analytical modeling of two-dimensional geotextile tube dewatering process. *Geosynthetics International*, 25, No. 2, 132–149. [<https://doi.org/10.1680/jgein.17.00038>].
- Recio, J. & Oumeraci, H. (2007). Effect of deformations on the hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers. *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (2007) 278-292.
- Recio, J. & Oumeraci, H. (2009). Process based stability formulae for coastal structures made of geotextile sand containers. *Coastal Engineering*, 56 (2009) 632-658.
- Richardson, J. & Zaki, W. (1954). Sedimentation and fluidisation: part I. *Chemical Engineering Research and Design*, 32, 35–53.
- Ritcey, G.M. (2005). Tailings management in gold plants. *Hydrometallurgy*, Vol. 78, No. 1–2, pp. 3–20.
- Saathoff, F., Oumeraci, H. & Restall, S. (2007). Australian and German experiences on the use of geotextile containers. *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (2007) 251-263.

- Seay, P.A & Plaut, R.H. (1998). Three-dimensional behavior of geosynthetic tubes. *Thin-walled Structures*, 32 (1998) 263-274.
- Shin, E.C. & Oh, Y.I. (2003). Analysis of geotextile tube behaviour by large-scale field model test. *Geosynthetics International*, 2003, 10, (4).
- Shin, E.C. & Oh, Y.I. (2007). Coastal erosion prevention by geotextile tube technology. *Geosynthetics International*, 2007, 25, 264-277.
- Silva V., Gardoni, M., and Maia, K. 2020. Numerical modeling of geotextile tubes filling process with gold mine tailings. *Geosynthetics International*.
- Silva, L. (2017). Geotextile tubes to dewater, confine, and stack finegold ore tailings, M.Sc Thesis, Federal University of Minas Gerais, Dept. of Transportation and Geotechnical Engineering, Brazil, Department of Transportation and Geotechnical Engineering. Belo Horizonte, Brazil. (in Portuguese).
- Silva, V. 2019. Analysis of the behaviour of geotextile pipes for containment of fine mining waste through numerical modeling, MSc. Thesis, Federal University of Minas Gerais, Dept. of Transportation and Geotechnical Engineering, Brazil, 168 p. (in Portuguese).
- Silvester, R. (1986). Use of grout-filled sausages in coastal structures. *Journal of Waterwat, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 112, No.1, January, 1986.
- Sundar, V., Sannasiraj, S. A. & Babu, S. R. (2021): Sustainable hard and soft measures for coastal protection – Case studies along the Indian Coast, *Marine Georesources & Geotechnology*, DOI: 10.1080/1064119X.2021.1920650.
- Tatto, J. (2014). Comportamento de Filtros Geotêxteis em Taludes Sujeitos a Impactos de Ondas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-097/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123 p.
- Thompson, A., Oberhagemann, K. & She, Y. (2020). Geobag stability for riverbank erosion protection structures: Physical model study. *Geotextiles and Geomembranes* 48 (2020) 110–119.
- Tyagi, V.K. & Mandal, J.N. (2006). Physical and Numerical Modelling of Stacked Geotubes Subjected to Dynamic Loads. *Proceedings of the International Conference on Civil Engineering in the Oceans VI*. DOI- 10.1061/40775(182)28.
- Vale (2019). Obras de contenção e recuperação ambiental das áreas atingidas em Brumadinho e região. Disponível em < http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atuacoes_brumadinho/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 9 julho, 2019.
- Verburg, R., (2002). Paste technology for disposal of acid-generating tailings. *Mining Environmental Management*, Vol. 10, No. 8, pp. 14–18.
- Wang, C., Yang, S. & Liu, R. (2011). Design Method for Flat Geotextile Tubes filled with Inhomogeneous Slurry. *Advanced Materials Research*, Vols 261-263 (2011) pp 628-632. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.261-263.628.
- Wilke, M., Breytenbach, M., Reunanen, J., & Hilla, V.M. (2015). Efficient and environmentally sustainable tailings treatment and storage by geosynthetic dewatering tubes: working principles and Talvivaara case study. In: *Proceedings Tailings and Mine Waste*, Vancouver. 25-28 Oct.

- Yang, Yonghao, Wei, Z., Cao, G., Yang, Yan, Wang, H., & Zhuang, S. (2019). A case study on utilizing geotextile tubes for tailings dams construction in China. *Geotextiles and Geomembranes* 47, 187-192.
- Yee, T. W. & Lawson, C. R. (2012). Modelling the geotextile tube dewatering process. *Geosynthetics International*, 2012, 19, No. 5.
- Yee, T. W. (2015). Dredging works and geotextile tube applications for construction of the longest sea-crossing bridge in Vietnam. Proceedings of Western Dredging Association and Texas A&M University Center for Dredging Studies' "Dredging Summit and Expo 2015.
- Yilmaz, E. (2007). How efficiently the volume of wastes produced from mining operations can be reduced without causing any significant environmental impact. Environmental Synthesis Report, University of Quebec at Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Canada, pp. 1–50.
- Yilmaz, E. (2011). Advances in reducing large volumes of environmentally harmful mine waste rocks and tailings. Department of Applied Sciences, University of Québec at Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Canada.
- Zhu, M., Viswanath, M., Ebrahimi, A. & Beech, J.F. (2014). Slope Stability Charts for Stacked Geotextile Tubes. *Geo-Congress 2014 Technical Papers*, GSP 234 © ASCE 2014.