



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

**PROPOSIÇÃO DE UM EQUIPAMENTO EM MODELO FÍSICO A 1G PARA A
SIMULAÇÃO DE DESLIZAMENTOS SUPERFICIAIS EM TALUDE NÃO
SATURADO INDUZIDOS POR PRECIPITAÇÃO ARTIFICIAL**

ANA PAOLA DO NASCIMENTO DANTAS, MSc

ORIENTADOR: PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc

TESE DE DOUTORADO

BRASÍLIA/DF – FEVEREIRO/2024

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

**PROPOSIÇÃO DE UM EQUIPAMENTO EM MODELO FÍSICO A 1G PARA A
SIMULAÇÃO DE DESLIZAMENTOS SUPERFICIAIS EM TALUDE NÃO
SATURADO INDUZIDOS POR PRECIPITAÇÃO ARTIFICIAL**

ANA PAOLA DO NASCIMENTO DANTAS, MSc

**EXAME DE TESE DE DOUTORADO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA.**

APROVADA POR:

**PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)**

**PROFa. MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**PROF. ROBERTO QUENTAL COUTINHO, DSc (UFPE)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**PROFa. MÁRCIA MARIA DOS ANJOS MASCARENHA, DSc (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 12 de FEVEREIRO de 2024

PROPOSIÇÃO DE UM EQUIPAMENTO EM MODELO FÍSICO A 1G PARA A SIMULAÇÃO DE DESLIZAMENTOS SUPERFICIAIS EM TALUDE NÃO SATURADO INDUZIDOS POR PRECIPITAÇÃO ARTIFICIAL

RESUMO

O aumento das emissões de gases de efeito estufa, a poluição dos oceanos, os desmatamentos em grande escala, o aumento da demanda energética e hidráulica, além de outros excessos produzidos pela ação antrópica tem contribuído para a aceleração em ritmo não natural das mudanças climáticas. Como consequência da transmutação climática, foi observado que nos últimos anos houve um aumento significativo dos fenômenos climáticos, dentre eles, os movimentos de massa induzidos por eventos intensos de precipitação. Estes fenômenos, naturalmente, são processos de gênese da superfície terrestre, mas que apresentam um grave risco geológico, devido à magnitude de destruição causada nos ambientes urbanos. Assim, diversos métodos, baseados em ferramentas computacionais, foram desenvolvidos para auxiliar no entendimento das condições de contorno do fluxo de água no talude. Entretanto, a modelagem física também se mostrou promissora, pela possibilidade de reprodução dos mecanismos de falha em laboratório. Neste contexto, a partir da abrangência de possibilidades de análise dos fenômenos de fluxo e falha que se pode produzir em um modelo físico, o objetivo desta Tese de Doutorado foi de propor um equipamento que possibilitasse analisar o desempenho de um modelo físico de talude, em pequena escala a 1g, durante a simulação de percolação de água e de deslizamentos superficiais induzidos por precipitação artificial. Para isto, foi construído um *Equipamento Experimental* em estrutura metálica, inspirado no equipamento de Pajalić *et al.* (2021), com dimensões de 220 cm (comprimento) x 110 cm (largura) x 125 cm (altura maior) e 57 cm (altura menor), contando com uma inclinação de 30°. Também foi instalado um sistema de chuva artificial composto por minibombas de alta pressão e aspersores de água para a reprodução de uma precipitação de até 78 mm/h. Além disto, para a instrumentação do modelo físico foram utilizados sensores de umidade, tensiômetros e um mini infiltrômetro de disco para o monitoramento e verificação dos parâmetros geotécnicos durante as simulações planejadas para a execução do programa experimental. Como resultado, obteve-se uma ferramenta de produção de dados confiáveis de um modelo físico de talude, para estudos que envolvam análises de fluxo e estabilidade, principalmente em simulações computacionais.

Palavras-chave: Modelagem Física; Construção de Equipamento, Modelo Físico de Talude em Pequena Escala a 1g; Movimentos de Massa; Infiltração em Solo Não Saturado.

PROPOSAL OF A 1G PHYSICAL MODEL EQUIPMENT FOR THE SIMULATION OF SURFACE LANDSLIDES IN UNSATURATED SLOPES INDUCED BY ARTIFICIAL PRECIPITATION

ABSTRACT

The increase in greenhouse gas emissions, ocean pollution, large-scale deforestation, increased energy, and hydraulic demand, as well as other excesses produced by human action, have contributed to the unnatural acceleration of climate change. As a consequence of climate change, it was observed that in recent years, there has been a significant increase in climate phenomena, including mass movements induced by intense precipitation events. These phenomena, naturally, are processes of genesis of the Earth's surface, but they present a severe geological risk due to the magnitude of destruction caused in urban environments. Thus, several methods based on computational tools were developed to help understand the boundary conditions of water flow on the slope. However, physical modeling also showed promise due to the possibility of reproducing failure mechanisms in the laboratory. In this context, based on the range of possibilities for analyzing flow and failure phenomena that can be produced in a physical model, the objective of this Doctoral Thesis was to propose equipment that would make it possible to analyze the performance of a physical slope model, in small scale at 1g, during the simulation of water percolation and surface landslides induced by artificial precipitation. For this, Experimental Equipment was built in a metallic structure, inspired by the equipment of Pajalić et al. (2021), with dimensions of 220 cm (length) x 110 cm (width) x 125 cm (largest height) and 57 cm (smallest height), with an inclination of 30°. An artificial rain system consisting of high-pressure mini pumps and water sprinklers was also installed to produce rainfall of up to 78 mm/h. Furthermore, for the instrumentation of the physical model, humidity sensors, tensiometers, and a mini disc infiltrometer were used to monitor and verify the geotechnical parameters during the simulations planned for the execution of the experimental program. As a result, a tool for producing reliable data from a physical slope model was obtained for studies involving flow and stability analyses, mainly in computer simulations.

Keywords: Physical Modeling; Equipment Construction, Small Scale Slope Physical Model at 1g; Mass Movements; Infiltration in Unsaturated Soil.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 ESTRUTURA DA TESE	4
CAPÍTULO 2	6
2 INTER-RELAÇÕES ENTRE A INFILTRAÇÃO E A ESTABILIDADE DE TALUDES – ABORDAGEM TEÓRICA E EXPERIMENTAL.....	6
2.1 Mudanças Climáticas <i>versus</i> Movimentos de Massa	6
2.2 Interações Solo-Atmosfera	9
2.3 Relações Constitutivas Fundamentais para Solos Não Saturados	12
2.3.1 Fluxo transiente em solos não saturados	12
2.3.2 Resistência ao cisalhamento de solos não saturados	18
2.4 Estabilidade de taludes não saturados sujeitos à infiltração	20
2.4.1 Principais tipos de deslizamentos de encostas	22
2.4.2 Ferramentas e técnicas para a avaliação e prevenção de deslizamentos	26
2.5 Modelos reduzidos de representação física de taludes	28
2.5.1 Leis de semelhança e modelagem	28
2.5.2 Efeito Escala e suas implicações	34
2.5.3 Histórico da modelagem física de taludes	35
CAPÍTULO 3	51
3 METODOLOGIA	51
3.1 Equipamento experimental	51
3.2 Sistema de chuva artificial.....	53
3.3 Material Geotécnico	58
3.4 Instrumentação.....	60

3.5	Programa Experimental	68
3.5.1	Fase de testes	68
3.5.2	Determinação dos parâmetros hidráulicos e mecânicos da areia fina	81
3.5.3	Calibração do sistema de chuva artificial do Equipamento Experimental.....	92
3.5.4	Montagem do modelo físico de talude em pequena escala	93
3.5.5	Cenários de análise.....	101
CAPÍTULO 4		104
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	104
4.1	Apresentação dos resultados.....	104
4.2	Padrões de comportamento a partir dos resultados experimentais	130
CAPÍTULO 5		137
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	137
5.1	Considerações finais	137
5.2	Sugestões para pesquisas futuras	139
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		141

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação dos maiores desastres naturais por número de mortes. Fonte: Banco Mundial (2005).....	7
Tabela 2.2. Resumo das características sobre os principais tipos de deslizamentos. Fonte: Highland & Bobrowsky (2008).....	25
Tabela 2.3. Principais referências em modelagem física de taludes (1g) e as características de seus modelos	49
Tabela 3.1. Principais especificações técnicas da minibomba de alta pressão.	57
Tabela 3.2. Parâmetros de <i>Van Genuchten</i> para classes de textura do solo e valores de A_G para raio do disco de 2,25 cm e valores de sucção de 0,5 a 6 cm	66
Tabela 3.3: Principais características do sistema de monitoramento do Modelo Físico.....	67
Tabela 3.4: Parâmetros físicos da areia fina conforme a umidade inicial (h_i) e a compacidade relativa (CR) adotadas	75
Tabela 3.5: Características gerais da areia fina utilizada na construção do modelo físico.	94
Tabela 3.6: Informações das quantidades de areia e água utilizados na construção do modelo físico de talude, de acordo com a geometria indicada.....	95
Tabela 3.7: Detalhamento dos ensaios no modelo físico de talude em pequena escala.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Gráfico da temperatura superficial entre os anos de 1850 – 2020. Fonte: IPCC 2023.	6
Figura 2.2. Ilustração das ocorrências globais de movimentos de massa, registradas no catálogo global de deslizamentos entre os anos de 2007 e 2016 (Kirschbaum et al., 2010; Kirschbaum et al., 2015), incluindo as fatalidades associadas. Fonte: Whiteley <i>et al.</i> (2019) modificado de Uhlemann (2018).....	8
Figura 2.3. Elevação do número de publicações a respeito do tema: Deslizamentos de Terra. Fonte: Modificado de Gariano & Guzzetti (2016).	9
Figura 2.4. Representação de um elemento de solo: a) Solo seco. b) Solo não saturado. c) Solo saturado. d) Elemento de solo tridimensional não saturado com fase de ar contínua. Fonte: adaptado de Fredlund & Rahardjo (1993).	10
Figura 2.5. Distribuições de poropressões da água.	11
Figura 2.6. Representação da curva de retenção do solo – <i>SWRC</i> , com ilustração das diferentes zonas de dessaturação do solo não saturado. Fonte: adaptado de Zhai & Rahardjo (2013). ...	14
Figura 2.7. Função de condutividade típica para uma areia e um silte argiloso plotado em escala logarítmica. Fonte: adaptado de Fredlund (2000)	16
Figura 2.8. Superfície de falha estendida de <i>Mohr-Coulomb</i> para solo não saturado.....	20
Figura 2.9. Ilustração dos modelos de cálculo da estabilidade: (a) Método de Equilíbrio Limite; e (b) Método do Talude Infinito.....	22
Figura 2.10. Esquema ilustrativo dos principais tipos de movimentos de massa: (a) queda rochosa; (b) tombamento; (c) escorregamento rotacional; (d) escorregamento translacional; (e) fluxo de detritos e; (f) fluxo lentos de terra. Fonte: Highland & Bobrowsky (2008).	23
Figura 2.11. Objetos geometricamente similares com fator escala de ½. Fonte: modificado de Zohuri (2015)	32
Figura 2.12. Propriedades do solo de <i>Omigawa</i> no Japão. Fonte: Modificado de Orense <i>et al.</i> (2004).	38
Figura 2.13. Esquema ilustrativo e fotografia do tanque experimental. Fonte: Modificado de Orense <i>et al.</i> (2004).	39

Figura 2.14. Tipos de processos de falha visualizados no programa experimental. Fonte: Modificado de Tohari <i>et al.</i> (2007)	41
Figura 2.15- Caracterização física e hidráulica do solo do modelo reduzido. (a) Curva granulométrica; e (b) <i>SWRC</i> da areia. Fonte: Modificado de Schnellmann <i>et al.</i> (2010).....	42
Figura 2.16. Caixa experimental utilizada em Schnellmann <i>et al.</i> (2010): (a) vista do acoplamento dos sensores; (b) vista em perspectiva do equipamento; e (c) vista dos bicos de produção da chuva artificial.	43
Figura 2.17. Curva granulométrica do solo utilizado. Fonte: Modificado de Egeli & Firat Pulat (2011).	44
Figura 2.18. Equipamento – <i>SWIMS</i> de Egeli & Firat Pulat (2011): (a) Equipamento e seus componentes; e (b) <i>SWIMS</i> em processo de ensaio. Fonte: Modificado de Egeli & Firat Pulat (2011)	44
Figura 2.19. Equipamento desenvolvido por Pajalić <i>et al.</i> (2021): (a) Esquema ilustrativo e instrumentação utilizada; (b) Fotografia do modelo físico. Fonte: Modificado de Pajalić <i>et al.</i> (2021)	46
Figura 2.20. Modelo físico em pequena escala desenvolvido por Pajalić <i>et al.</i> (2021). Fonte: Pajalić <i>et al.</i> (2021)	48
Figura 3.1: Esquema geral do desenvolvimento metodológico da pesquisa.....	51
Figura 3.2. Esquema ilustrativo do <i>Equipamento Experimental</i> desenvolvido.	52
Figura 3.3. Fotografia do Equipamento de Simulação proposto. (a) Vista lateral; (b) Vista frontal.	53
Figura 3.4. Vista do <i>setup</i> do sistema de chuva artificial sobre o modelo físico. Setas demonstrando a direção do fluxo de água.	54
Figura 3.5. Aspersores utilizados no sistema de chuva artificial: (a) Imagem dos aspersores do tipo <i>Rain Bird X360 ADJ</i> e; (b) aspersores acoplados em pares no cano PVC de distribuição de água.	55
Figura 3.6. Imagens dos canos e mangueiras de distribuição de água: (a) cano de PVC de 25 mm acoplado na haste central; (b) bicos metálicos para o acoplamento das mangueiras e; (c) distribuidor vertical de PVC com uma entrada e três saídas.....	56
Figura 3.7. Válvula reguladora de pressão de água 3/4” polegada com manômetro utilizada.	56

Figura 3.8. Minibomba d'água de alta pressão da fabricante <i>Rhondamaq</i> para a promoção da precipitação artificial.....	57
Figura 3.9. Tanque de armazenamento de água.....	58
Figura 3.10. Distribuição granulométrica da areia fina utilizada para a construção do modelo físico em pequena escala.....	59
Figura 3.11. Ilustração do sensor TEROS 10, utilizado para a medição do teor de umidade volumétrica: (a) Ilustração do equipamento; (b) Sensor instalado em campo. Fonte: (Adaptado de Manual TEROS 10. Disponível em: (http://publications.metergroup.com/Manuals/20788_TEROS10_Manual_Web.pdf).....	61
Figura 3.12. Volume de influência do TEROS 10. Fonte: (Manual TEROS 10. Disponível em: (http://publications.metergroup.com/Manuals/20788_TEROS10_Manual_Web.pdf).....	62
Figura 3.13. Ilustração do sensor TEROS 21 ou MPS-6, utilizado para a medição da sucção e temperatura. Fonte: Adaptado de Manual TEROS 21. Disponível em: (http://library.metergroup.com/Manuals/20854_TEROS21_Gen2_Manual_Web.pdf).....	63
Figura 3.14. Curva de retenção da cerâmica do sensor TEROS 21 derivados de dados de porosímetro de mercúrio. Fonte: Adaptado de Manual TEROS 21. Disponível em: (http://library.metergroup.com/Manuals/20854_TEROS21_Gen2_Manual_Web.pdf).....	64
Figura 3.15. Ilustração do Mini infiltrômetro de disco (<i>MID</i>): (a) representação completa com indicação dos componentes do infiltrômetro; e (b) representação da câmara Mariotte. Disponível em: (https://publications.metergroup.com/Manuals/20421_Mini_Disk_Manual_Web.pdf).....	65
Figura 3.16: Interface do <i>software</i> ZENTRA <i>Utility</i> para a leitura de dados.	67
Figura 3.17. Modelo físico do equipamento teste de simulação. (a) Esquema ilustrativo sem escala. (b) Foto do equipamento de simulação montado.	69
Figura 3.18. Sistema de simulação artificial de chuva. (a) Foto dos quatro aspersores <i>Rain Bird</i> do tipo X360 ADJ utilizados; (b-c) Fotos em perspectiva e frontal do sistema de simulação de chuva artificial, respectivamente.....	70
Figura 3.19. Esquema ilustrativo do processo de retroalimentação de água no modelo reduzido.	71
Figura 3.20. Posicionamento das cápsulas para teste de homogeneidade de aspersão.	71

Figura 3.21. Testagem da instrumentação geotécnica. (a) TERSOS 10; (b) TERSOS 21	72
Figura 3.22: Testagem da instrumentação geotécnica em solos com umidades iniciais de 0, 5 10 e 15%. (a) TERSOS 10; (b) TERSOS 21.	73
Figura 3.23. Ilustração do <i>layout</i> de ensaio na etapa de testes.	74
Figura 3.24. Definição das geometrias do talude e posicionamento dos sensores para o Lado Esquerdo (<i>LE</i>) e Lado Direito (<i>LD</i>).	74
Figura 3.25. Montagem do talude na <i>caixa teste</i> : (a) Vista lateral; (b) Vista superior; e (c) <i>caixa teste</i> coberta por papel filme.	76
Figura 3.26. Ensaio de simulação de uma chuva artificial sobre o modelo reduzido até o rompimento. (a) Início do ensaio; (b) Observação da frente de umedecimento; (c) Aparecimento de sulcos derivados do escoamento superficial e (d) Deslizamento superficial do talude do <i>LD</i>	77
Figura 3.27. Resposta dos sensores de umidade TERSOS 10 no período de ensaio. Leitura de dados: (a) Talude do <i>LE</i> ; (b) Talude do <i>LD</i> com a indicação do início do aparecimento de zonas de fragilidade.	78
Figura 3.28. Resposta dos tensiômetros TERSOS 21 no Período de Ensaio. Leitura de dados: (a) Talude do <i>LE</i> ; (b) Talude do <i>LD</i>	78
Figura 3.29. Ensaio de simulação somente para o <i>LE</i> com inclinação da <i>caixa teste</i> . (a) Vista lateral da caixa inclinada; (b) Demarcação em vermelho da região erodida e (c) Deslizamento superficial do talude do <i>LD</i>	79
Figura 3.30. Resposta dos sensores período de ensaio com inclinação da <i>caixa teste</i> em 17°. Leitura de dados: (a) TERSOS 10 e; (b) TERSOS 21.	80
Figura 3.31. Esquema ilustrativo do <i>layout</i> de ensaio para a determinação do <i>SWRC</i> por umedecimento.	82
Figura 3.32. Procedimento de instalação dos sensores de umidade e tensiômetros: (a) a 10 cm da superfície de solo; (b) a 5 cm da superfície de solo; e (c) cobrimento dos sensores até 5 cm do topo da coluna de PVC.	82
Figura 3.33. Calibração do TERSOS 10 para a areia fina utilizada.	83
Figura 3.34. Resultado do 1º ensaio de infiltração acumulada (<i>IA</i>) medida pelo <i>MID</i> com a indicação da equação quadrática.	84

Figura 3.35. Resultado do 11º ensaio de infiltração acumulada (<i>IA</i>) medida pelo <i>MID</i> com a indicação da equação quadrática.	85
Figura 3.36. Taxas de precipitação, de infiltração e de percolação em relação ao tempo.	86
Figura 3.37. Gráfico do teor de umidade volumétrica pelo tempo, resultado do ensaio de coluna.	87
Figura 3.38. Gráfico da sucção pelo tempo, resultado do ensaio de coluna.	88
Figura 3.39. Curvas <i>SWRC</i> experimentais geradas por medições em colunas: (a) <i>SWRC</i> medido para 10 cm de profundidade; (b) <i>SWRC</i> medido para 5 cm de profundidade; e (c) <i>SWRC</i> médio.	89
Figura 3.40. Ensaio de cisalhamento direto no equipamento automático MS 102 da fabricante <i>Owntec</i> : (a) Fotografia do equipamento MS 102 no Laboratório GeoFluxo – UnB; e (b) fotografia da célula de cisalhamento.	90
Figura 3.41. Gráfico da tensão cisalhante x deslocamento horizontal, originada do ensaio de cisalhamento direto.	90
Figura 3.42. Gráfico do deslocamento vertical x deslocamento horizontal, originado do ensaio de cisalhamento direto.	91
Figura 3.43. Gráfico da tensão cisalhante x tensão normal, originado do ensaio de cisalhamento direto.	92
Figura 3.44. Posicionamento das cápsulas para teste de homogeneidade de aspersão e verificação das intensidades de precipitação no Equipamento Experimental. (Dimensões internas do equipamento)	92
Figura 3.45. Testes em três etapas alternando o funcionamento dos 06 aspersores.	93
Figura 3.46. Representação dos blocos e camadas de montagem do modelo físico de talude: (a) vista lateral; e (b) vista em planta.	95
Figura 3.47: Processo de montagem das 03 camadas do Bloco 01: (a) vista lateral da primeira camada; (b) vista frontal da primeira camada; (c) vista lateral da segunda camada; (d) vista lateral da segunda camada; (e) vista lateral da regularização da terceira camada e; (f) vista frontal da terceira camada regularizada.	97
Figura 3.48. Processo de montagem das 04 camadas do Bloco 02 e a instalação da instrumentação: (a) vista lateral preenchimento de solo na região do declive; (b) vista frontal	

do preenchimento; (c) posicionamento dos sensores; (e) data logger 1; (f) data logger 2; (g) vista lateral do preenchimento final do declive; e (h) vista frontal da finalização da montagem no declive.	99
Figura 3.49: Processo de montagem das 03 camadas do Bloco 03: (a) vista lateral da primeira camada de solo no BL 03; (b) vista lateral da segunda camada de solo no BL 03; (c) vista frontal da montagem; (d) vista lateral do talude montado; (e) vista da base do talude e; (f) vista em planta do talude.	101
Figura 4.1. Gráfico dos resultados do teor de umidade volumétrica para o DL1 para as profundidades indicadas.	105
Figura 4.2. Gráfico dos resultados de sucção para o DL1 para as profundidades indicadas.	106
Figura 4.3. Diagrama da intensidade de chuva em mm/h e a chuva acumulada em mm durante o 1º Ensaio.	106
Figura 4.4. Gráfico do 1º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.	107
Figura 4.5. Gráfico do 1º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.	108
Figura 4.6. Gráfico do 1º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.	109
Figura 4.7. Gráfico do 1º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.	110
Figura 4.8. Fotografias do modelo físico de talude em pequena escala durante o 1º Ensaio: (a) início do ensaio; e (b) fim do ensaio.	110
Figura 4.9. Diagrama da intensidade de chuva em mm/h e a chuva acumulada em mm durante o 2º Ensaio.	111
Figura 4.10. Gráfico do 2º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.	112
Figura 4.11. Gráfico do 2º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.	113
Figura 4.12. Gráfico do 2º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.	114

Figura 4.13. Gráfico do 2º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.....	114
Figura 4.14. Fotografias do modelo físico de talude em pequena escala durante o 2º Ensaio: (a) início do ensaio; e (b) fim do ensaio.	115
Figura 4.15. Diagrama da intensidade de chuva em mm/h e a chuva acumulada em mm durante o 3º Ensaio.....	116
Figura 4.16. Gráfico do 3º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.	116
Figura 4.17. Gráfico do 3º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.....	117
Figura 4.18. Gráfico do 3º ensaio dos resultados de teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.	118
Figura 4.19. Gráfico do 3º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.....	118
Figura 4.20. Fotografias do modelo físico de talude em pequena escala durante o 3º Ensaio: (a) início do ensaio; e (b) fim do ensaio	119
Figura 4.21. Diagrama da intensidade de chuva em mm/h e a chuva acumulada em mm durante o 4º Ensaio.....	120
Figura 4.22. Gráfico do 4º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.	120
Figura 4.23. Gráfico do 4º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.....	121
Figura 4.24. Gráfico do 4º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.	122
Figura 4.25. Gráfico do 4º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.....	122
Figura 4.26. Fotografias do modelo físico de talude em pequena escala durante o 1º Ensaio: (a) início do ensaio; (b) momento do desligamento do sistema de aspersores e (c) fim do ensaio.	123

Figura 4.27. Diagrama da intensidade de chuva em mm/h e a chuva acumulada em mm durante o 5º Ensaio.....	124
Figura 4.28. Gráfico do 5º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.	125
Figura 4.29. Gráfico do 5º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.....	126
Figura 4.30. Gráfico do 5º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.	127
Figura 4.31. Gráfico do 5º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.....	128
Figura 4.32. Fotografias do modelo físico de talude em pequena escala durante o 1º Ensaio: (a) 0 min de ensaio (início do ensaio); (b) após 10 min de ensaio; (c) após 20 min de ensaio; (d) após 30 min de ensaio; (e) após 40 min de ensaio; (f) após 50 min de ensaio; (g) após 60 min de ensaio; (h) após 70 min de ensaio; (i) após 80 min de ensaio e; (j) após 90 min de ensaio (fim do ensaio).	130
Figura 4.33. Comparação dos resultados dos teores de umidade obtidos dos 05 ensaios, com a indicação dos intervalos de chuva indicados pela cor azul.	132
Figura 4.34. Acúmulo de água no equipamento experimental: (a) pé do talude e (b) calha..	133
Figura 4.35. Comparação dos resultados dos teores de umidade obtidos dos 05 ensaios, com a indicação dos intervalos de chuva indicados pela cor azul.	134
Figura 4.36. Ilustração do processo de desenvolvimento da ruptura não circular retrogressiva do modelo físico de talude: (a) início do processo de acúmulo de água no pé do talude; (b) acúmulo de água em maior quantidade na base e início da falha; (c) aumento da ruptura próximo à base; (d) verificação de ruptura não circular retrogressiva; (e) alcance da ruptura na região do topo e; (f) finalização do ensaio com a ruptura no topo do talude.	136

LISTA DE SÍMBOLOS

Nomenclaturas e Símbolos	Significado
$C(z,t)$	função auxiliar da solução analítica de Cavalcante & Zornberg (2017a)
A	área
A_G	Parâmetro de van Genuchten
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BL	bloco
BS	<i>British Standards</i>
c	coesão aparente
c'	coesão efetiva
C_c	coeficiente de curvatura
C_u	coeficiente de uniformidade
D_{10}	tamanho efetivo da partícula
D_{30}	tamanho efetivo da partícula
D_{50}	tamanho efetivo da partícula
D_{60}	tamanho efetivo da partícula
<i>DL</i>	<i>data logger</i>
<i>DR</i>	densidade relativa ou compacidade relativa
E	Módulo de Young
$e_{máx}$	índice de vazios máximo
$e_{mín}$	índice de vazios mínimo
e_{nat}	índice de vazios natural
FS	fator de segurança
g	aceleração da gravidade
G_s	densidade real dos grãos
h	umidade desejada
h_h	umidade higroscópica
h_i	umidade inicial
h_w	carga hidráulica
<i>IA</i>	infiltração acumulada
INA	indicador de nível d'água
<i>IoT</i>	<i>internet of things – internet</i> das coisas
<i>IPCC</i>	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
<i>ISSMGE</i>	Comitê Técnico da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
k_{nsat}	condutividade hidráulica não saturada
k_s	condutividade hidráulica saturada do solo
k_x	condutividade hidráulica não saturada na direção x

k_y	condutividade hidráulica não saturada na direção y
k_z	condutividade hidráulica não saturada na direção z
L	comprimento
LD	Lado Direito
LE	Lado Esquerdo
LP	Limite de Plasticidade
m	modelo
M	massa
MID	mini infiltrômetro de disco
n	porosidade
n	número de parâmetros independentes
NA	nível d'água
NBR	Norma Brasileira
NP	não-plástico
OMM	Organização Meteorológica Mundial
p	protótipo
P_h	peso da amostra de solo úmida
$PPGG$	Programa de Pós-Graduação em Geotecnia
p_r	unidade de pressão
PVC	policloreto de vinil
P_w	peso da água
Q	descarga
r	número mínimo de referências dimensionais
RAW	valor bruto de saída do data logger
$SUCS$	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
$SWIMS$	<i>Soil-Water Interaction Modelling System</i> – Sistema de Modelagem das Interações Solo-Água
$SWRC$	<i>Soil-Water Retention Curve</i> - curva de retenção de água no solo
T	tempo
t	tempo
TDR	<i>Time domain reflectometry</i> – reflectômetro no domínio do tempo
u_a	pressão do ar nos poros do solo
$u_a - u_w$	sucção mátrica
UnB	Universidade de Brasília
u_w	pressão da água nos poros do solo
V	velocidade
v_0	velocidade de descarga de água

v_x	velocidade de percolação na direção x
v_y	velocidade de percolação na direção y
v_z	velocidade de percolação na direção z
w	teor de umidade gravimétrica
y	desempenho
$y_{critico}$	desempenho crítico
z	carga altimétrica ou profundidade
α	ângulo de inclinação do talude
γ_{nat}	peso específico natural do solo
γ_w	peso específico da água
δ	parâmetro de ajuste hidráulico
ϵ_a	atividade dielétrica aparente
θ	teor de umidade volumétrica
θ_i	teor de umidade inicial
θ_r	teor de umidade volumétrica residual
θ_s	teor de umidade volumétrica saturada
μ	viscosidade dinâmica
Π	Número Pi
ρ	densidade
ρ_d	massa específica aparente seca
ρ_{nat}	massa específica natural
ρ_s	massa específica dos sólidos
ρ_w	densidade do fluido
σ	tensão total
σ'	tensão efetiva
$\sigma_n - u_a$	tensão normal líquida
σ_s	tensão superficial
ϕ	carga hidráulica total
ϕ'	ângulo de atrito efetivo
ϕ^b	ângulo de atrito interno
χ	parâmetro de tensão efetiva
ψ	sucção total
ψ_{cin}	potencial cinético da água no solo
ψ_{cr}	sucção crítica
ψ_m	potencial matricial da água no solo
ψ_{osm}	potencial osmótico da água no solo
ψ_p	potencial de pressão da água no solo
ψ_{temp}	potencial térmico da água no solo
ψ_z	potencial de posição ou gravitacional

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A periodicidade e a intensidade dos fenômenos climáticos (ex.: ondas de calor, secas, chuvas intensas) são uma preocupação mundial e que desafiam os tomadores de decisão e pesquisadores por serem eventos naturais difíceis de prever e de determinar.

Segundo Gariano & Guzzetti (2016) é indiscutível o fato de que as mudanças climáticas afetam a estabilidade de encostas. Entretanto, esta relação de causa e efeito se torna complexa quando se analisa aspectos, como: o tipo, a extensão, a magnitude e a direção destas mudanças nas condições de estabilidade e, também, na localização e na frequência dos deslizamentos de terra em função das variações do clima.

O termo deslizamentos é utilizado para representar os movimentos de massa de solo ou rocha sobre a superfície terrestre, incluindo quedas de rochas e escorregamentos de detritos, sendo um dos mais importantes processos de formação da paisagem (Cruden, 1991; Petley, 2010; e Petley, 2012). Contudo, quando estes fenômenos naturais se dão em locais onde existe a ocupação irregular de comunidades, em consequência da falta de planejamento urbano e do crescimento desordenado das cidades, os deslizamentos representam um grave risco geológico que tem causado grandes consequências à população e ao meio ambiente (Orense *et al.*, 2004; e Pajalić *et al.*, 2021).

No Brasil e no mundo, situações adversas causadas por eventos extremos de precipitação têm promovido uma recorrência nos movimentos de massa. Desta forma, as chuvas exercem um papel fundamental para a promoção dos deslizamentos de terra, pois a água que é infiltrada interage com os parâmetros do solo, influenciando de modo complexo e dinâmico as condições de contorno de fluxo sobre o talude, que por sua vez, são determinantes para o comportamento e o desempenho mecânico de uma encosta (Luíz *et al.*, 2012; e Silva Júnior, 2015).

Conforme explica Lade (2010), a estabilidade superficial das encostas é seriamente afetada pela precipitação, pois a resistência ao cisalhamento dos solos não saturados é gradativamente reduzida, devido à diminuição da sucção mátrica, como resultado da infiltração que satura as camadas mais superficiais dos declives, provocando as rupturas.

Neste contexto, o grupo de pesquisa GeoFluxo, do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (PPGG) da UnB, vem estudando o fenômeno de fluxo em meios porosos não saturados com aplicação em campos multidisciplinares.

Mais especificamente, os principais trabalhos dos pesquisadores do grupo que contribuíram para áreas afins a esta pesquisa, se deram na: proposição de modelos constitutivos para a determinação de curvas uni e bimodais de retenção dos solos, para a representação do comportamento de um solo não saturado (Cavalcante & Zornberg, 2017a e 2017b; Costa & Cavalcante, 2020, 2021a e 2021b; Cavalcante & Mascarenhas, 2021; Borges *et al.*, 2022; e Mascarenhas & Cavalcante, 2022), em técnicas de análise determinística e probabilística da estabilidade de taludes em solos não saturados (Cavalcante & Camapum de Carvalho, 2017; Rojas, 2017; Silva, 2018; Dantas & Cavalcante, 2021; Santos *et al.*, 2021; e Figueredo de Sousa *et al.*, 2021) e em técnicas de instrumentação e monitoramento de solos não saturados (Góis *et al.*, 2021, e Ozelim *et al.*, 2022).

De acordo com Orense *et al.* (2004), a minimização dos danos causados por movimentos de massa tem sido realizada amplamente em duas categorias. Uma por meio de técnicas invasivas de controle com métodos de estabilização de encostas, como o uso de muros de contenção, técnicas de rebaixamento do nível d'água, estacas de ancoragem, entre outros; e a outra utiliza-se de técnicas relacionadas à implementação de sistemas de monitoramento de encostas e previsão de movimentos de massa, com a utilização de sistemas de alerta e avisos antecedentes aos tomadores de decisões, para a gestão do risco e o planejamento de ações emergenciais.

Portanto, com a evolução dos modelos analíticos de caracterização de solos não saturados e de cálculo da estabilidade de taludes, conclui-se que a adoção de sistemas de alerta e a gestão do risco tornou-se a opção mais viável em muitas regiões, devido às restrições financeiras e ambientais. Para estabelecer sistemas de alerta precisos, os esforços concentram-se em compreender os mecanismos de evolução da instabilidade e as condições que induzem as falhas.

Segundo Pajalić *et al.* (2021), durante muito tempo, a modelagem dos deslizamentos de terra fundamentou-se apenas em formulações matemáticas de modelos numéricos para prever sua ocorrência. Contudo, a modelagem física dos deslizamentos utilizando modelos de simulação de comportamento tem se mostrado promissora, ao permitir a reprodução dos mecanismos de falha em laboratório facilitando a compreensão, a visualização e o acompanhamento do desenvolvimento dos processos de ruptura.

A utilização de modelos físicos reduzidos começou entre os anos 1970 e 1980 no Japão, com a simulação de deslizamentos em encostas naturais expostas à chuva artificial (Pajalić *et al.*, 2021). Desde então, as experiências em laboratório do comportamento dos deslizamentos de terra em um modelo físico, que na Literatura internacional são denominados de calha ou teste de calha (em inglês, “flume” ou “flume test”), foram sendo continuamente estudados sob condições de 1g (Orense *et al.*, 2004; Tohari *et al.*, 2007; Damiano *et al.*, 2008; Schnellmann *et al.*, 2010; Egeli & Firat Pulat, 2011; Hakro & Harahap 2015; e Pajalić *et al.*, 2021); com o propósito principal de analisar as condições iniciais e a evolução do deslizamento de fluxo rápido de terra, induzidos pela infiltração em um declive.

É nesse contexto que se deu este projeto de doutorado, o qual é justificado pela necessidade de contribuição na proposição de ferramentas que auxiliem o estudo da previsão de movimentos de massa, visto que os deslizamentos quando ocorrem, por serem fenômenos rápidos, os dados relacionados aos parâmetros do solo e os fatores climáticos que induziram o colapso, acabam se perdendo durante o processo de rompimento. Portanto, as pesquisas voltadas para a definição dos indicativos de falha, geralmente, têm de ser fundamentadas em retroanálises para a determinação de prováveis fatores que justifiquem a ruptura.

Assim, a pesquisa propõe a construção de um equipamento de análise do comportamento de um modelo físico de talude, em pequena escala a 1g, para simular deslizamentos superficiais em um ambiente controlado, para que com o acompanhamento do desempenho dos parâmetros do solo em tempo real, da precipitação aplicada sobre o modelo e de cada movimentação de massa observada, este trabalho contribua para o estabelecimento desta ferramenta como um instrumento de produção de dados confiáveis de um modelo físico de talude, principalmente para estudos que envolvam análises de fluxo e estabilidade em simulações computacionais.

1.2 OBJETIVOS

Nesta tese de doutorado, o objetivo principal é de construir um *Equipamento Experimental* que possibilite analisar o desempenho de um modelo físico de um talude arenoso, sob condição não saturada, em pequena escala a 1g, quando submetido a uma precipitação artificial.

Desta forma, a partir deste objetivo geral, são objetivos específicos da tese:

- Investigar os processos de interação solo-atmosfera que levam uma encosta à ruptura induzida por precipitação;

- Analisar a conformação adotada e as características físicas, hidráulicas e mecânicas do solo arenoso em estado não saturado para a propensão à ruptura;
- Instrumentar o modelo físico de talude para determinar as técnicas de monitoramento que melhor se adequam à escala do modelo e acompanhar o desempenho transiente dos parâmetros do solo até a falha;
- Proporcionar o fornecimento de subsídios em trabalhos correlatos que simulem computacionalmente o comportamento transiente do modelo físico;
- Validar o uso do equipamento como um instrumento de verificação da tendência de comportamento de instabilidade, quando sujeitos à infiltração, sob uma perspectiva teórico-experimental.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está dividida em 05 capítulos que contemplaram todos os assuntos de interesse para a melhor compreensão da construção do *Equipamento Experimental* efetuada para o alcance dos objetivos propostos. Sendo assim, o Capítulo 01 é composto pelas considerações iniciais em que foram introduzidos os assuntos que compõe esta tese, a partir de uma breve explanação a respeito dos aspectos relacionados à modelagem física de um talude, além da justificativa de realização deste trabalho, os objetivos propostos e a relevância desta pesquisa.

No Capítulo 02 é apresentada a revisão bibliográfica, em que foram discutidos todos os aspectos relacionados direto e indiretamente à construção de um modelo físico de talude, a simulação de um processo de ruptura induzido por chuva e seus fenômenos físicos, hidráulicos e mecânicos associados. Desta maneira, foram discutidos assuntos como: as inter-relações entre o solo e a atmosfera, as características dos solos não saturados, as relações entre a estabilidade de taludes e a infiltração de água de chuva, finalizando com a caracterização geral e o histórico dos modelos reduzidos de representação física de taludes.

No Capítulo 03 são abordados os aspectos relacionados à metodologia desta tese. Neste capítulo foram apresentados as etapas preliminares e o planejamento dos ensaios que antecederam a execução dos testes pretendidos no *Equipamento Experimental*. Portanto, foram detalhados: o projeto de construção do *Equipamento Experimental*, o sistema de aplicação de uma chuva artificial, os estudos do material geotécnico utilizado para a construção do talude, a instrumentação utilizada e o programa experimental proposto.

No Capítulo 04 são apresentados os resultados obtidos a partir do programa experimental. Nesta etapa da tese foram discutidos todos os resultados encontrados pelas leituras dos equipamentos de instrumentação e as percepções visuais de indicativos de

anomalias durante os 05 cenários de análise propostos. Além disso, foi realizado um compilado geral para a comparação dos dados encontrados nas duas linhas de instrumentação (direita e esquerda), para a indicação de um padrão de comportamento do modelo simulado frente às variações do programa experimental.

Por fim, no Capítulo 05 é apresentada a conclusão desta Tese de Doutorado. Nesta etapa de fechamento da pesquisa, foram revisitadas as principais considerações obtidas durante todas as etapas da pesquisa. Posteriormente, também foram sugeridas algumas complementações à esta tese, a fim de ampliar o estudo sobre este tema em pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

2 INTER-RELAÇÕES ENTRE A INFILTRAÇÃO E A ESTABILIDADE DE TALUDES – ABORDAGEM TEÓRICA E EXPERIMENTAL

Este capítulo tem a finalidade de apresentar o embasamento teórico que dará suporte a construção desta tese de doutorado. Assim, é importante salientar que nesta revisão bibliográfica serão explorados os conceitos já consolidados na literatura básica de referência da Geotecnia para a construção do estado da arte desta pesquisa.

2.1 Mudanças Climáticas *versus* Movimentos de Massa

Emissões de gases de efeito estufa, poluição dos oceanos, desmatamentos em grande escala, excessos de demanda energética e hidráulica, para o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC (2023) é inequívoco que todas estas interferências antrópicas tem contribuído para o agravamento das mudanças climáticas. As avaliações do IPCC (2023) também têm demonstrado que houve um crescimento de 1,1°C de 2011 a 2020 em comparação com o período de 1850 a 1900, conforme observa-se na Figura 2.1. Este quadro confirma que a temperatura global está aumentando em ritmo acelerado e, segundo projeções da instituição, a temperatura continuará aumentando gradativamente até o fim deste século.

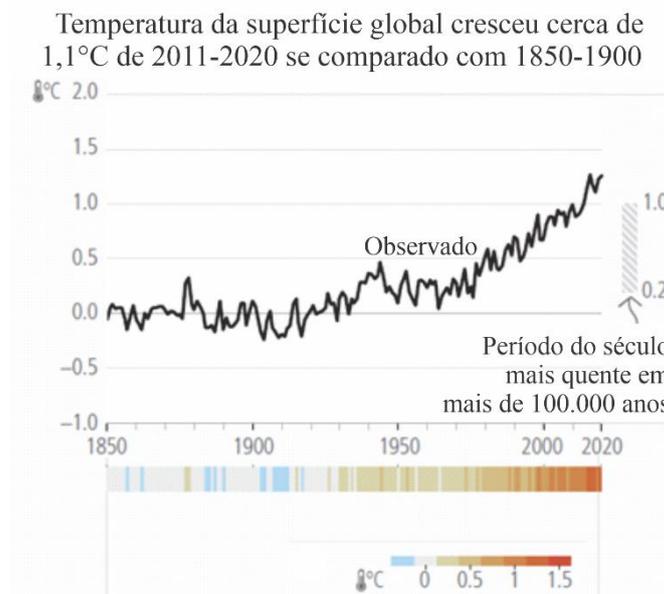


Figura 2.1. Gráfico da temperatura superficial entre os anos de 1850 – 2020. Fonte: IPCC 2023.

As projeções que estão sendo efetuadas pela comunidade científica associadas à questão climática, revelam um panorama de desequilíbrio dos processos ambientais relacionados a um

aumento na frequência de fenômenos adversos, como: ciclones e tempestades extratropicais, inundações, ondas de calor, secas, eventos de precipitação extremos, deslizamentos de terra, derretimento de geleiras, aumento dos níveis dos oceanos (McBean & Ajibade, 2009, Gariano & Guzzetti, 2016; Chiarle *et al.*, 2021; IPCC, 2023).

Ainda a respeito dessas ameaças supracitadas, conforme o Atlas de Mortalidade e Perdas Econômicas decorrentes de Extremos Meteorológicos, Climáticos e Hídricos da Organização Meteorológica Mundial - OMM (1970 – 2019) realizado por Douris *et al.* (2021), houve mais de 11.000 desastres relatados atribuídos a estes perigos em todo o mundo, com pouco mais de 2 milhões de mortes e 3,64 bilhões de dólares em perdas.

Por outro lado, conforme o Banco Mundial (2005) a quantidade de vidas perdidas, devido ao alto poder destrutivo dos desastres naturais, está diretamente relacionada com o nível de vulnerabilidade em que a população mundial está exposta. Na Tabela 2.1 pode-se observar a quantidade de vidas perdidas, relacionadas ao tipo de desastre. Além disto, as perdas relacionadas a estes desastres podem ter uma menor magnitude, envolvendo perdas de elementos individuais, podendo alcançar até um patamar de catástrofe, em que os sistemas econômicos e sociais se desintegram parcial ou completamente, conduzindo a impactos socioeconômicos muito maiores.

Tabela 2.1. Classificação dos maiores desastres naturais por número de mortes. Fonte: Banco Mundial (2005)

Classificação	Tipo de Desastres	Total de Mortes 1980-2000	Mortes 1992-2000
1	Seca	563.701	277.574
2	Tempestade	251.384	60.447
3	Inundação	170.010	96.507
4	Terremoto	158.551	77.756
5	Vulcão	25.050	259
6	Temperatura Extrema	19.249	10.130
7	Deslizamentos	18.200	9.461
8	Tsunami	3.068	2.708
9	Incêndio	1.046	574
Total		1.211.159	535.416

Mais especificamente, a respeito dos movimentos de massa, que consiste em um dos desastres naturais de maior incidência mundial, na Figura 2.2 está apresentado a ocorrência de

fatalidades associadas aos deslizamentos distribuídas no globo segundo a elevação da superfície de cada região.

Conforme a Figura 2.2, observa-se uma alta incidência de regiões elevadas, bem como de alto índice de fatalidades provocadas por deslizamentos de terra em áreas como o Sudeste e Centro-Oeste asiático e nas Américas Central e do Sul. Entretanto, observa-se também uma baixa incidência de fatalidades em áreas consideradas elevadas em partes da Europa e América do Norte. Portanto, pode-se inferir que países vulneráveis, do ponto de vista econômico e social, possuem maior suscetibilidade aos danos causados pelos deslizamentos, devido à carência em sistemas e programas efetivos de mitigação de desastres (Whiteley *et al.*, 2019).

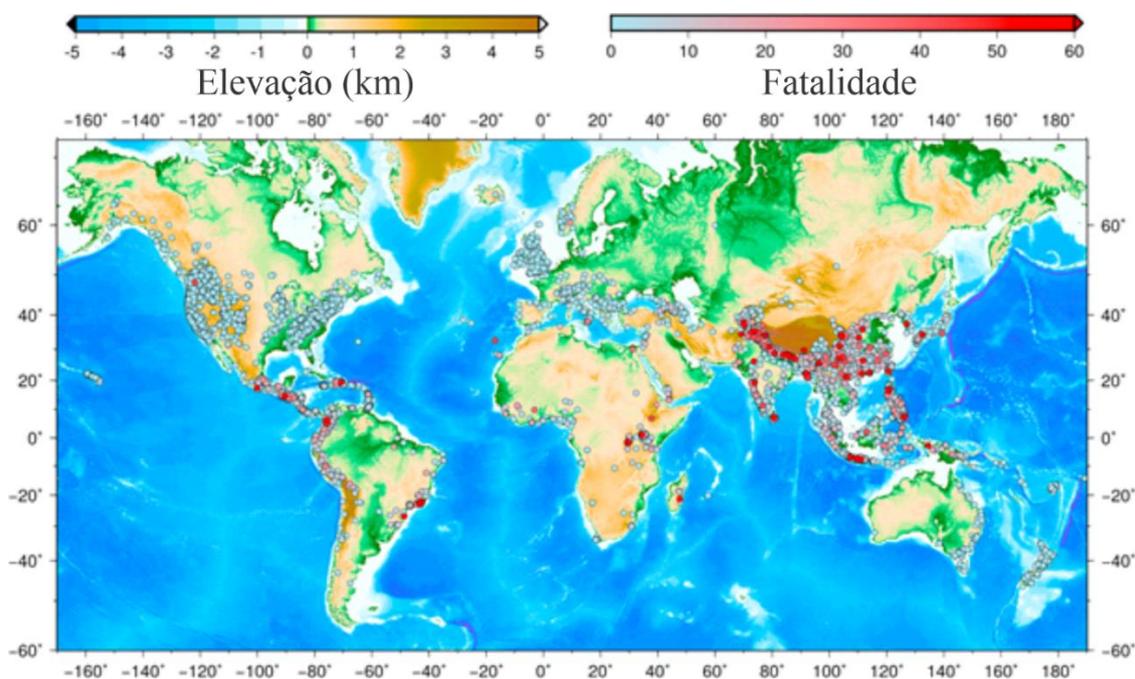


Figura 2.2. Ilustração das ocorrências globais de movimentos de massa, registradas no catálogo global de deslizamentos entre os anos de 2007 e 2016 (Kirschbaum *et al.*, 2010; Kirschbaum *et al.*, 2015), incluindo as fatalidades associadas. Fonte: Whiteley *et al.* (2019) modificado de Uhlemann (2018).

Por outro lado, para demonstrar a relevância do tema em estudo nesta tese, apresenta-se também o trabalho dos autores Gariano & Guzzetti (2016), que abordam em sua pesquisa a relação de causa e efeito do clima e a ocorrência de deslizamentos e enfatizam a necessidade de entender e mensurar como as variáveis climáticas e sua mutabilidade afetam as ameaças de deslizamentos. Além disso, os autores também apresentam o crescimento das pesquisas científicas e em paralelo das pesquisas relacionadas somente ao estudo dos movimentos de

massa e do estudo combinado clima e deslizamento. Na Figura 2.3 pode-se observar esta evolução do número de publicações ao longo dos anos.

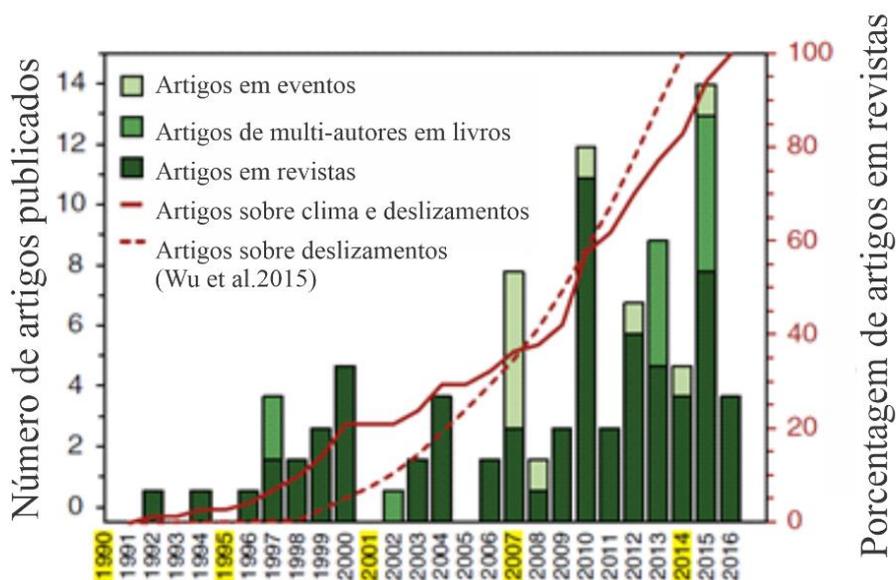


Figura 2.3. Elevação do número de publicações a respeito do tema: Deslizamentos de Terra.

Fonte: Modificado de Gariano & Guzzetti (2016).

2.2 Interações Solo-Atmosfera

Entender os processos e as causas que levam uma encosta à ruptura induzida por eventos de precipitação requer conhecimentos das alterações que ocorrem no interior do solo, principalmente pelas mudanças nos teores de umidade e das poropressões provocadas pela infiltração de água de chuva. Inicialmente, enfatiza-se a relevância de conceitos da Hidrologia para embasar a discussão acerca dos processos de circulação de água no meio físico até a sua chegada na fronteira solo-atmosfera.

O conceito fundamental para o estudo das interações solo-atmosfera está diretamente relacionado ao ciclo hidrológico. Porém, diante da complexidade de cada processo que compõe o ciclo hidrológico, somente os fenômenos principais de precipitação, evapotranspiração, interceptação vegetal, infiltração e escoamento superficial são considerados em muitos estudos, apesar de já apresentarem um elevado grau de complexidade para sua determinação.

Os solos presentes nas camadas mais superficiais de um terreno estão mais sujeitos à essas interações com a atmosfera. Portanto, estes solos caracterizam-se, geralmente, por apresentarem uma condição não saturada, em que as poropressões negativas apresentam-se nas regiões acima do nível freático. Isto se deve à proximidade com a superfície do terreno, camada de solo sujeita a processos de evaporação e perda de umidade para a atmosfera. Conforme

explica Gitirana Jr. *et al.* (2012), esta condição se deve também a outros fatores, como: aos gradientes de carga hidráulica que determinam o regime de fluxo e a posição do lençol freático.

O campo de estudos de solos não saturados se estende a uma situação ainda mais complexa, como é o caso da franja capilar, que consiste na região imediatamente acima do nível freático, onde o solo também pode encontrar-se saturado, porém atuam poropressões negativas. Nesta faixa peculiar, o solo permite esta saturação por ação de mecanismos capilares que compilam aspectos físicos, como o diâmetro dos interstícios capilares com os aspectos de natureza química e mineralógica, como as forças de adsorção (Fredlund, 2006; e Gitirana Jr. *et al.*, 2012).

Nesse sentido, atribui-se à Mecânica dos Solos Não Saturados o estudo de materiais encontrados na prática da engenharia, cujo comportamento diverge com os princípios da Mecânica dos Solos Clássica, que analisam o solo em seu estado seco ou saturado, conforme Figura 2.4(a) e (c), respectivamente. Um solo não saturado encontra-se em um estado de preenchimento parcial de água em seus vazios, e é comumente caracterizado por possuir três fases (sólidos, água, e ar.) (Figura 2.4(b)).

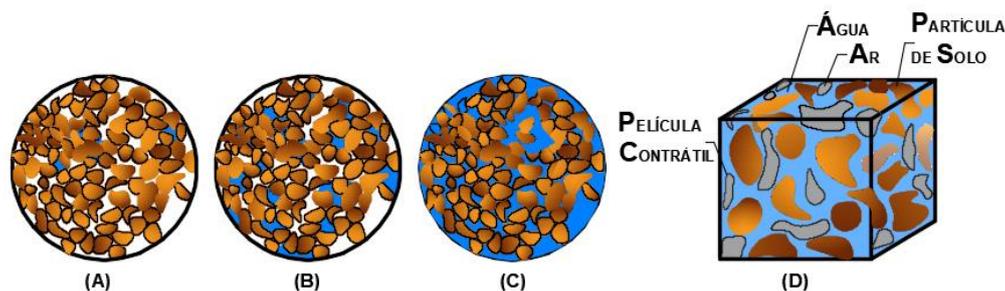


Figura 2.4. Representação de um elemento de solo: a) Solo seco. b) Solo não saturado. c) Solo saturado. d) Elemento de solo tridimensional não saturado com fase de ar contínua. Fonte: adaptado de Fredlund & Rahardjo (1993).

Todavia, de acordo com Fredlund & Morgenstern (1977) é correto reconhecer a existência de uma quarta fase, a película contrátil, presente na interface ar-água que por meio de suas interações com a estrutura de solo, influencia na mudança de volume e na resistência ao cisalhamento de solos nestas condições (Figura 2.4(d)) (Fredlund & Rahardjo, 1993; e Fredlund, 2006).

Relacionado à distribuição de poropressões da água em um terreno (Figura 2.5), na região onde o estado do solo encontra-se não saturado, a diferença de pressão entre as fases ar e água, ($u_a - u_w$), é negativa e denominada de sucção mátrica do solo (ψ_m). Normalmente, esta grandeza é utilizada para representar o estado de energia da água em solos não saturados.

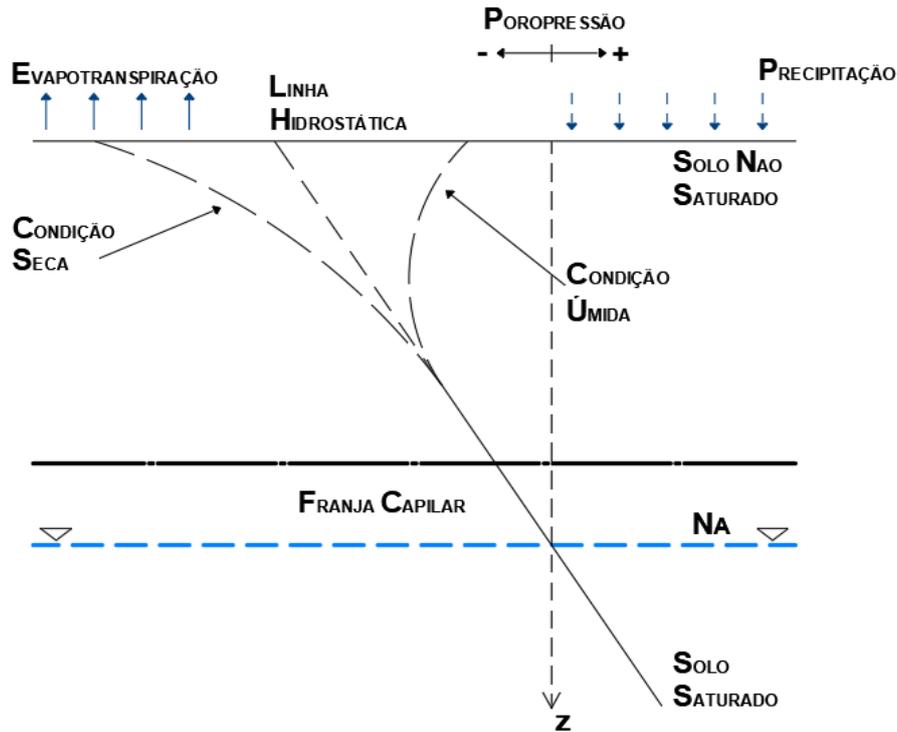


Figura 2.5. Distribuições de poropressões da água.

O parâmetro da sucção total, ψ , conforme Lu & Likos (2004), é definido como o potencial termodinâmico da água presente nos poros em relação ao potencial de água livre. Este potencial, segundo Machado & Vilar (2015), pode ser representado pela equação da energia de Bernoulli acrescida dos potenciais osmótico, matricial e térmico, dado por:

$$\psi = \psi_{temp} + \psi_z + \psi_{cin} + \psi_p + \psi_m + \psi_{osm} \quad (2.1)$$

onde, ψ é o potencial total da água no solo ($ML^{-1}T^{-2}$), ψ_{temp} é o potencial térmico da água no solo ($ML^{-1}T^{-2}$), ψ_z é o potencial de posição ou gravitacional ($ML^{-1}T^{-2}$), ψ_{cin} é o potencial cinético da água no solo ($ML^{-1}T^{-2}$), ψ_p é o potencial de pressão da água no solo ($ML^{-1}T^{-2}$), ψ_m é o potencial matricial da água no solo ($ML^{-1}T^{-2}$) e o ψ_{osm} é o potencial osmótico da água no solo ($ML^{-1}T^{-2}$).

De acordo com Machado & Vilar (2015), o ψ_{temp} será relevante quando existirem grandes diferenças de temperatura no domínio estudado, o ψ_z consiste na energia potencial do campo gravitacional da terra e seu valor será importante em solos saturados ou próximos à saturação, o ψ_{cin} está associado à velocidade do fluxo de água no solo e em geral é considerada desprezível por este movimento ser lento.

Sobre o ψ_p somente será considerado se a pressão atuante sobre a água for maior que a pressão atmosférica, sendo assim, para a maioria dos casos de estudo em solos não saturados,

admite-se a hipótese de continuidade da fase de ar em seus vazios e, portanto, a pressão do ar intersticial pode ser admitida como igual à atmosférica, o ψ_m está associado ao efeito conjunto dos fenômenos de capilaridade existentes nos interstícios da massa de solo e de adsorção que mantém a água aderida às partículas sólidas e, finalmente, o ψ_{osm} está relacionado ao fato de a água no solo ser uma solução de sais mineiras e outros solutos, porém já foi verificado que mudanças neste potencial pouco interferem nas propriedades geotécnicas, portanto a consideração deste parâmetro passa a ser significativa em problemas de contaminação do solo.

Conforme é descrito por Mascarenhas (2022), o gradiente de energia é expresso de forma adimensional, portanto, é utilizado o conceito de carga hidráulica (medida de densidade de energia por massa). Assim, a conversão das parcelas de potencial (Eq. 2.1) resulta na carga hidráulica total do solo. Ademais, tem-se que a sucção mátrica é a soma dos termos de densidade de energia causado pelos termos de potencial matricial e de pressão do solo, em condição não saturada.

Em diferentes análises que exigem o cálculo da sucção total, ψ , existem casos que alguns componentes da Eq. 2.1 podem ser desprezados ou negligenciados por motivos de não serem relevantes dentro do domínio de interesse do estudo.

Portanto, para este trabalho em específico será considerado somente os efeitos do ψ_m , por influenciar diretamente no comportamento de solos não saturados, como por exemplo, em situações em que a redução da sucção mátrica provoca a diminuição das forças capilares e de adsorção, alterando a tensão superficial entre os grãos e, conseqüentemente, diminuindo a coesão do solo. Além disto, segundo Fredlund & Xing (1994), para altos valores de sucção (acima de 1500 kPa) a sucção mátrica e a total podem ser consideradas equivalentes.

2.3 Relações Constitutivas Fundamentais para Solos Não Saturados

Nos tópicos a seguir, serão apresentados uma síntese de parte das relações constitutivas relevantes para descrever o comportamento de solos não saturados. Primeiramente, serão descritas as relações associadas ao processo de fluxo e, então, as relações constitutivas entre as variáveis de estado serão apresentadas.

2.3.1 Fluxo transiente em solos não saturados

O fluxo em meios porosos é determinado pelo gradiente de carga hidráulica sob condições de poropressão positiva ou negativa (Childs and Collis-George, 1950; e Fredlund, 2006). Por sua vez, para que haja fluxo entre dois pontos é necessário que a carga hidráulica total em cada ponto seja diferente. Desta forma, a água fluirá sempre de um ponto de maior

energia para um ponto de menor energia total. O parâmetro de carga hidráulica pode ser calculado como:

$$h_w = \frac{\psi}{\rho_w g} - z \quad (2.2)$$

onde, h_w é a carga hidráulica do fluido (L), ψ denota a sucção total [$\text{MT}^{-2}\text{L}^{-1}$], ρ_w é a densidade do fluido (ML^{-3}), g é a aceleração da gravidade (LT^{-2}), e z é a carga de elevação (L).

A determinação da velocidade de fluxo foi inicialmente descrita por Darcy (1856) para um fluxo macroscópico de água em um solo do tipo arenoso, homogêneo, isotrópico, não deformável, com temperatura constante e saturado; em função de sua condutividade hidráulica (coeficiente de permeabilidade) multiplicada ao gradiente hidráulico.

Para abranger a condição não saturada de solos, Buckingham em 1907, propôs uma generalização fundamentando-se na teoria de fluxos de calor e elétrico, desta forma, o autor introduziu uma relação entre a condutividade hidráulica e a sucção total do solo. Esta equação é conhecida por *Equação de Darcy-Buckingham* e pode ser descrita por:

$$v_x = -\frac{k_x(\psi)}{\gamma_w} \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2.3)$$

$$v_y = -\frac{k_y(\psi)}{\gamma_w} \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (2.4)$$

$$v_z = -k_z(\psi) \left(\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \quad (2.5)$$

onde, v_x , v_y e v_z são as velocidades de percolação nas direções x , y e z (LT^{-1}); $k_x(\psi)$, $k_y(\psi)$ e $k_z(\psi)$ são as funções de condutividade hidráulica expressa em termos da sucção total ψ , nas direções x , y e z , respectivamente (LT^{-1}), γ_w é o peso específico da água [$\text{MT}^{-2}\text{L}^{-2}$].

A respeito da condutividade hidráulica, este parâmetro é geralmente assumido como constante em todos os estados de tensão para um solo saturado (k_s). Todavia, isto não ocorre para um solo na condição não saturada, em que dependendo do estado de tensão referente ao parâmetro de sucção total (ψ), a condutividade hidráulica pode variar bastante. Ainda que qualquer mudança no estado de tensão do solo possa afetar este parâmetro, a sucção mátrica (ψ_m) é o principal parâmetro que influencia na quantidade de água no solo, sendo assim, a ψ_m tem influência dominante (Lu & Likos, 2004; Fredlund, 2006; e Machado & Vilar, 2015).

Segundo Croney *et al.* (1958), citado por Fredlund (2006), o estado de tensão na zona não saturada pode variar de zero, na posição do nível freático, até uma tensão máxima de aproximadamente 1.000.000 kPa, que caracteriza a sucção do solo na condição seca. O parâmetro de sucção é influenciado pelo teor de umidade presente na matriz de solo e varia conforme a elevação ou a redução de umidade e pode ser definida *in situ* ou em condições de laboratório, como por exemplo, por meio da curva de retenção de água no solo (*Soil-Water Retention Curve - SWRC*), representada na Figura 2.6.

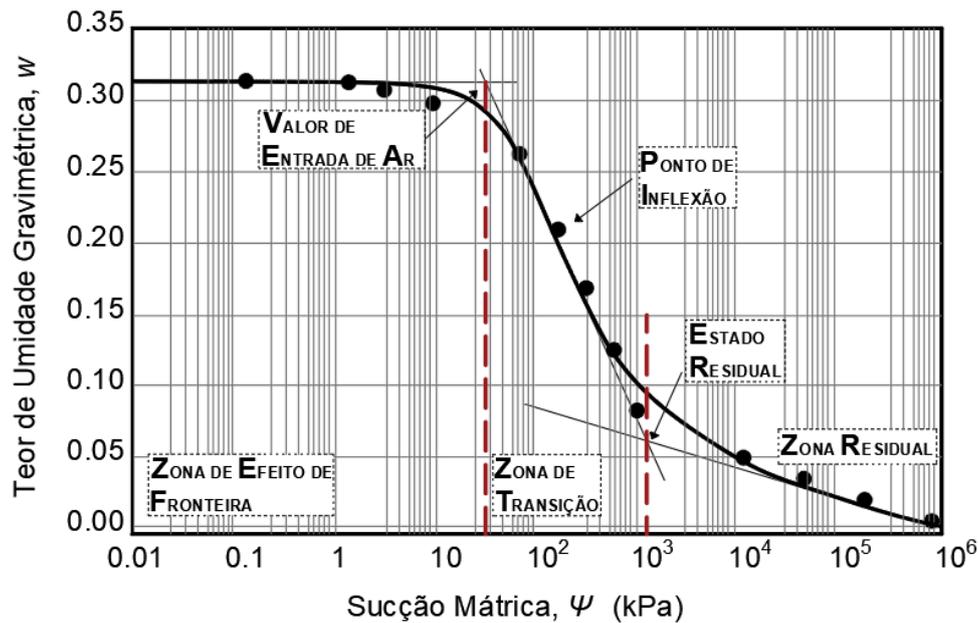


Figura 2.6. Representação da curva de retenção do solo – *SWRC*, com ilustração das diferentes zonas de dessaturação do solo não saturado. Fonte: adaptado de Zhai & Rahardjo (2013).

A determinação direta da *SWRC* pode ser conduzida por meio de dispositivos de medições da sucção, denominados de tensiômetros ou por meio de técnicas de medições indiretas, como: a técnica do papel filtro, psicrômetro, sensor de condutividade térmica, câmara de *Richards*, entre outros.

Porém, para a utilização destes métodos demanda-se muito tempo e trabalho para a concepção dos resultados, ademais há a necessidade da preparação de amostras deformadas ou da manipulação de sensores, que geralmente possuem um custo elevado e agridem o esqueleto do maciço de solo para sua instalação. Outro ponto importante é a dificuldade de determinação dos dados, devido ao rápido umedecimento, principalmente em solos arenosos (Naik & Pekkat, 2022 e 2023).

Ainda conforme os autores Naik & Pekkat (2022), a *SWRC* estimada diretamente a partir da infiltração corresponde ao processo de umedecimento e é mais realista ao descrever o fluxo na zona não saturada do solo. Desta forma, algumas pesquisas tem sido desenvolvidas com a finalidade de gerar a *SWRC* diretamente de medições em laboratório (Šimůnek *et al.* 1999) e medições com o infiltrômetro de disco (Šimůnek *et al.* 1999; Šimůnek & van Genuchten, 1996).

Portanto, segundo apontam Fredlund & Xing (1994), um grande número de equações empíricas de forma fechada foi proposto para melhor ajustar os dados da curva de retenção, devido à dificuldade de determinação experimental da *SWRC*. Cada equação tem sua particularidade quanto à quantidade de parâmetros utilizados e também sobre quais curvas (de secagem ou de umedecimento) podem ser melhor ajustadas. Além disto, estas equações, melhor se adequam aos dados de laboratório utilizando uma análise de regressão de mínimos quadrados. Dentre os modelos consagrados da literatura geotécnica, pode-se citar os de: Gardner (1958), Brooks & Corey (1954), Brutsaert (1967), Laliberte (1969), Farrel and Larson (1972), Campbell (1974), Van Genuchten (1980), McKee and Bumb (1987), e Fredlung & Xing (1994).

Referente à condutividade hidráulica de um solo não saturado, este parâmetro não é determinado rotineiramente em laboratório. Em vez disto, este coeficiente para a condição saturada (k_s) e o *SWRC* são combinados para fornecer uma estimativa da função de permeabilidade e, portanto, pode ser descrito por meio de uma função ou equação matemática (*k-function*) (Brisson *et al.* 2002; e Fredlund 2006).

Numerosos procedimentos matemáticos também têm sido propostos para estimar o valor da função de condutividade hidráulica expressa em termos da sucção total ($k(\psi)$). Os modelos propostos podem ser categorizados tanto como equações empíricas, quanto teóricas derivadas de modelos macro e microscópicos (estatísticos) (Mualem 1986; e Fredlund 2006).

As empíricas descrevem a variação do coeficiente de permeabilidade em relação à sucção ($k(\psi)$) ou ao teor de umidade volumétrica ($k(\theta)$) e os parâmetros das equações são geralmente determinados usando um procedimento de ajuste da curva de retenção. Dentre as principais equações empíricas, pode-se citar: Wind (1955), Gardner (1958), Brooks & Corey (1964) e Rijtema (1965).

Os modelos teóricos com abordagens macroscópicas são expressões analíticas que consideram diferentes variáveis que influenciam no fluxo em solo, como por exemplo o modelo de Brooks & Corey (1964). E as abordagens microscópicas são aquelas fundamentadas em suposições estatísticas sobre a distribuição de poros e a interpretação da *SWRC*, em que o k_s e

a curva de retenção são utilizadas para resolver a forma integral dos modelos estatísticos e, portanto, formular a *k-function* (Fredlund, 2006). Alguns modelos mais utilizados são: Childs & Collis-George (1950), Burdine (1953), e Mualem (1976).

Todavia, conforme explica Fredlund (2006), as funções de condutividade hidráulica podem ser interpretadas a partir da *k-function* que à medida que o teor de umidade do solo diminui em escala aritmética, o coeficiente de permeabilidade também diminui em escala logarítmica. Como resultado, o coeficiente de permeabilidade pode diminuir em várias ordens de grandeza durante a dessaturação, como pode ser observado na Figura 2.7.

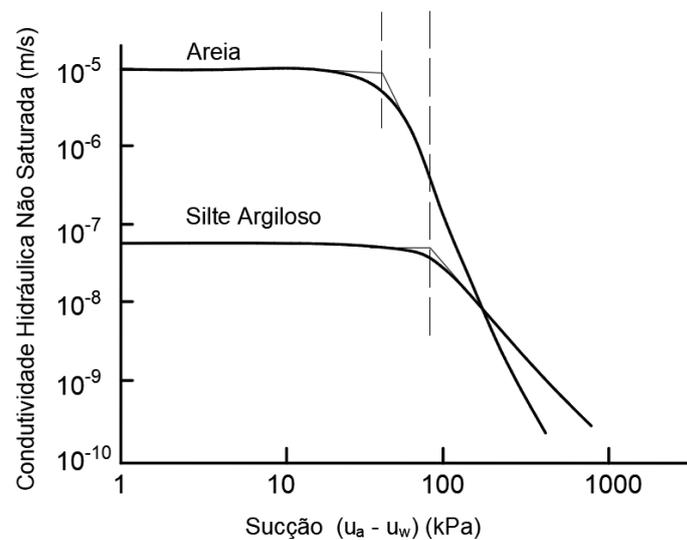


Figura 2.7. Função de condutividade típica para uma areia e um silte argiloso plotado em escala logarítmica. Fonte: adaptado de Fredlund (2000)

Lorenzo A. Richards, em 1931, formulou as bases teóricas para descrever o fluxo de água em um meio poroso não saturado e transiente, fundamentando-se no princípio de conservação de massa e na Equação de *Darcy-Buckingham* (Richards, 1931). Como resultado, o autor obteve a equação resultante que descreve o fluxo transiente unidimensional em um meio poroso não saturado pode ser descrita, como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k_z(\theta)}{\gamma_w} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial k_z(\theta)}{\partial z} \quad (2.6)$$

onde, θ é o teor de umidade volumétrica (L³L⁻³); e t é o tempo (T).

De posse da Eq. 2.6, o grande desafio é estabelecer condições para obter uma boa formulação para a solução da equação de Richards. Todavia, a solução da equação fornece um perfil de umidade do solo no espaço e no tempo caso as condições iniciais e de contorno sejam apropriadas. Neste contexto, soluções analíticas propostas sob variadas condições vêm sendo

aplicadas em problemas clássicos relacionados à física de um meio poroso e em hidrologia de águas subterrâneas, como por exemplo, para problemas relacionados à infiltração.

Conforme cita Lu & Likos (2004), uma das primeiras tentativas bem-sucedidas de descrever o processo de infiltração transiente de água em solo na condição não saturada foi a abordagem semianalítica de Green & Ampt (1911). O autor descreveu a entrada de água no solo como uma “frente de umedecimento acentuada” e que se move inicialmente a uma taxa relativamente rápida e diminui gradativamente com o tempo.

Posteriormente, outros autores propuseram modelos de quantificação da infiltração transiente (Horton, 1933; Philip, 1957; e Mein & Larson, 1973), porém, apesar destes modelos oferecerem um bom entendimento sobre a taxa de infiltração transiente, para uma compreensão mais apurada do fenômeno é requerido também informações a respeito da redistribuição associada ao teor de umidade e sucção durante a infiltração.

Estudos recentes, como o de Cavalcante & Zornberg (2017a), realizaram grandes avanços no estudo do fluxo em meios porosos não saturados para a condição transiente, em que descrevem matematicamente o fenômeno da infiltração partindo-se de uma modificação da Equação de Richards (Eq. 2.6), que possibilitou a obtenção de soluções analíticas para o problema.

Para isto, os autores propuseram modelos constitutivos para a representação de funções hidráulicas específicas expressas em termos da curva característica ($\psi(\theta)$) e da função de condutividade hidráulica não saturada ($k_z(\theta)$). No modelo foram impostas condições iniciais e de contorno para solucionar o problema analiticamente, assim a solução proposta pelos autores foi descrita por:

$$\theta(z, t) = \theta_i + \left[\frac{v_0}{k_s} (\theta_s - \theta_r) - \theta_i \right] C(z, t) \quad (2.7)$$

onde, θ_s é teor de umidade volumétrica saturada (L^3/L^3), θ_r é o teor de umidade volumétrica residual (L^3/L^3), θ_i é teor de umidade volumétrica inicial (L^3/L^3), o k_s é a condutividade hidráulica saturada do solo (L/T), v_0 é a velocidade de descarga de água imposta no contorno superior (LT^{-1}) e o $C(z, t)$ é a função auxiliar da solução analítica do modelo. Enfatiza-se que os parâmetros v_0 e $C(z, t)$ estão descritos no *paper* de Cavalcante & Zornberg (2017a).

Segundo Costa (2022), o modelo supracitado representa um avanço para a Mecânica dos Solos Não Saturados, pois os modelos constitutivos propostos, além de possibilitar a resolução explícita e analítica da Eq. 2.6, apresenta somente um parâmetro de ajuste (δ), que possui um significado físico bem definido e que varia conforme a granulometria dos solos,

sendo: para solos granulares, δ possui um valor maior e, para solos finos, δ possui um valor menor.

Neste sentido, trabalhos posteriores ao de Cavalcante & Zornberg (2017a), realizados por integrantes do grupo GeoFluxo, permitiram correlacionar o parâmetro δ com: a pressão de entrada de ar (Costa e Cavalcante, 2020), com a distribuição de poros (Sousa, 2019) e com a resistência não saturada (Cavalcante & Mascarenhas, 2021).

2.3.2 Resistência ao cisalhamento de solos não saturados

O comportamento mecânico dos solos é governado pelos parâmetros de resistência e pelas variáveis de estado de tensões que controlam o equilíbrio da estrutura de solo. Estas variáveis de estado podem ser definidas, no contexto da mecânica dos contínuos, como variáveis independentes das propriedades do solo, sendo necessárias para a caracterização de um sistema (Lu & Likos, 2004).

Retomando a definição de Terzaghi (1943) sobre o estado de tensão de um solo saturado, este pode ser descrito pela tensão total (σ) e poropressão (u_w) agrupados sob o conceito de tensão efetiva (σ'), em que a σ' é a diferença entre a σ e a u_w e que, fisicamente, representa a tensão experimentada pelo esqueleto do solo.

Bishop (1959) expandiu a abordagem da tensão efetiva clássica de Terzaghi (1943) para contemplar o estado não saturado do solo. Desta forma, o significado físico de tensão efetiva permaneceu o mesmo, mas considerou-se dois fatores, que foram: a tensão atuante na fase de ar (a pressão do ar presente nos vazios do solo, u_a) e a diferença entre a pressão do ar e a pressão da água, chamada de sucção mátrica ($u_a - u_w$). Assim, Bishop (1959) reescreveu a equação clássica da tensão efetiva, como se segue:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.8)$$

onde, $\sigma - u_a$ é a tensão normal líquida ($ML^{-1}T^{-2}$), $u_a - u_w$ é a sucção mátrica ($ML^{-1}T^{-2}$), e χ é o parâmetro de tensão efetiva, em que $\chi = 0$ corresponde a um solo completamente seco; e $\chi = 1$ corresponde a um solo totalmente saturado.

Contudo, conforme citam (Lu & Likos, 2004), existe uma contestação a respeito da consideração de Bishop (1959) ao tratar a tensão efetiva como uma variável de estado de tensão por considerarem limitada e inadequada para representar as relações de tensão- deformação de um solo não saturado.

De acordo com Fredlund & Rahardjo (1993), conceitualmente, uma variável de estado para ser imaterial, não poderia depender de um parâmetro que é função do próprio material em análise. Mas, Lu & Likos (2004) explicam que é possível demonstrar que a tensão efetiva de

Bishop é capaz de fornecer uma expressão adequada que descreve a força entre as partículas de um solo não saturado.

Neste sentido, os autores afirmam que em um meio multifásico, é provável que a quantidade relativa de cada fase influencie na descrição do estado de tensões do sistema, portanto, o fato de as variáveis materiais fazerem parte da definição de variáveis de estado não contradiz os princípios da mecânica dos contínuos (Mascarenhas, 2022).

Nesse contexto, novas correntes teóricas, empíricas e filosóficas foram propostas para superar estas limitações. Autores como Matyas & Radhakrishna (1968), introduziram a tensão normal líquida ($\sigma - u_a$) e a sucção mátrica ($u_a - u_w$) como parâmetros de estado de tensão, para descrever o comportamento do solo não saturado.

Entretanto, foi durante a década de 1970 com Fredlund & Morgenstern (1977), que foi fornecida as bases teóricas e a justificativa para a utilização de duas variáveis independentes do estado de tensão do solo.

Portanto, com base no conceito de variáveis de estado de tensão e na hipótese de variações lineares de resistência ao cisalhamento em relação à sucção, Fredlund *et al.* (1978) propuseram uma equação que descreve a resistência ao cisalhamento para solos não saturados, a partir de uma modificação no critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* (Figura 2.8). De uma forma geral, a equação pode ser descrita por:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.9)$$

onde, c' é a coesão efetiva ($ML^{-1}T^{-2}$), ϕ' é o ângulo de atrito efetivo ($^\circ$), $\sigma_n - u_a$ é a tensão total líquida ($ML^{-1}T^{-2}$), $u_a - u_w$ é a sucção mátrica ($ML^{-1}T^{-2}$), e ϕ^b é o ângulo de atrito interno ($^\circ$).

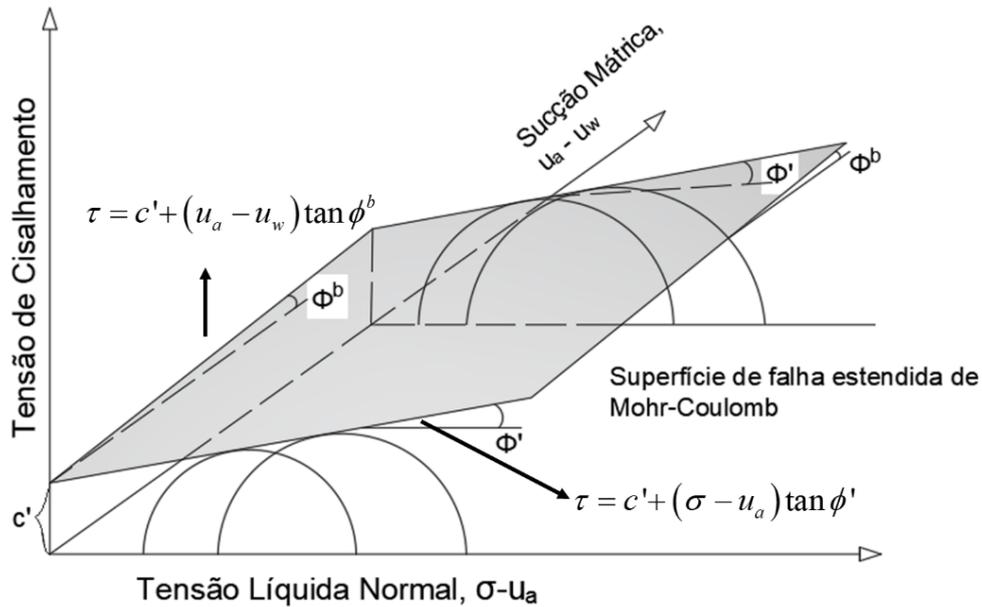


Figura 2.8. Superfície de falha estendida de *Mohr-Coulomb* para solo não saturado.

2.4 Estabilidade de taludes não saturados sujeitos à infiltração

Os declives presentes na crosta terrestre podem ser denominados de encostas ou taludes. As encostas são formações geomorfológicas originadas por causas naturais, enquanto os taludes são estruturas construídas para alguma finalidade de engenharia, como: os aterros construídos para estradas ou as laterais de cortes, canais, taludes de terra de barragens para armazenamento de água (Murthy, 2002)

A finalidade da análise da estabilidade, mais especificamente para taludes, é determinar as condições de desempenho de um declive, que consiste no cálculo do fator de segurança, razão que relaciona os esforços resistentes e os esforços atuantes. Neste contexto, as condições de desempenho dos taludes/encostas podem ser influenciadas por fatores que levam estas estruturas a instabilidades, como: forças gravitacionais, erosões na superfície dos declives, forças devido à terremotos e forças promovidas pela percolação de água.

A estabilidade dos taludes, mais especificamente, que se encontram na condição não saturada, quando sujeitos à infiltração de água de chuva, são largamente afetados pelas modificações produzidas pela água conforme eleva-se o teor de umidade no solo. Nas regiões tropicais, geralmente as encostas são formadas por solos residuais que se encontram na condição não saturada. Em períodos chuvosos, estas encostas analisadas sob condições de precipitação intensa ou prolongada, desenvolvem uma frente de umedecimento na região mais superficial, proveniente do processo de infiltração que conduzem os solos à perda de coesão aparente.

A coesão aparente é o resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, formando meniscos de água entre as partículas dos solos não saturados, que tendem a aproximá-las entre si. De acordo com Fredlund & Rahardjo (1993), a coesão aparente é uma parcela importante na resistência ao cisalhamento de solos não saturados, portanto, o processo de perda da coesão aparente pode levar o solo residual, que é formado sobre uma interface de base, a ocorrência de falha paralela à superfície da encosta, característica que permite a análise da estabilidade pelo método do talude infinito (Rahardjo *et al.*, 1995; Muntohar & Liao, 2010; e Shin *et al.*, 2013).

Em análises de estabilidade de taludes nos projetos de engenharia civil, o projetista pode optar pelas diversas possibilidades de cálculo da estabilidade, obedecendo as particularidades de cada projeto, que atualmente podem ser encontradas nos principais *softwares* comerciais. Desta forma, pode-se citar os Métodos de Equilíbrio Limite que consistem em arbitrar uma superfície de deslizamento, podendo-se assumir formas geométricas circulares ou não para a superfície de ruptura e proceder o cálculo do equilíbrio do maciço conforme as equações da estática (Figura 2.9 (a)). Autores como: Fellenius (1936), Janbu (1954), Bishop (1955), Morgenstern & Price (1965) e Spencer (1967) propuseram métodos de cálculo para a determinação do fator de segurança determinístico.

Outro método empregado para avaliação do desempenho de taludes é a análise clássica de talude infinito, geralmente implementada para a análise de estabilidade de encostas naturais. O método é apropriado quando o talude apresenta condições idênticas em qualquer seção vertical e o cálculo por este método é geralmente implementado, a partir da suposição de que as propriedades do solo são homogêneas e que a falha sempre ocorrerá na base do talude (Figura 2.9 (b)). A utilização deste método tem sido empregada por diversos pesquisadores como: Lade (2010), Griffiths *et al.* (2011), Egeli & Firat Pulat (2011), e Shin *et al.* (2013).

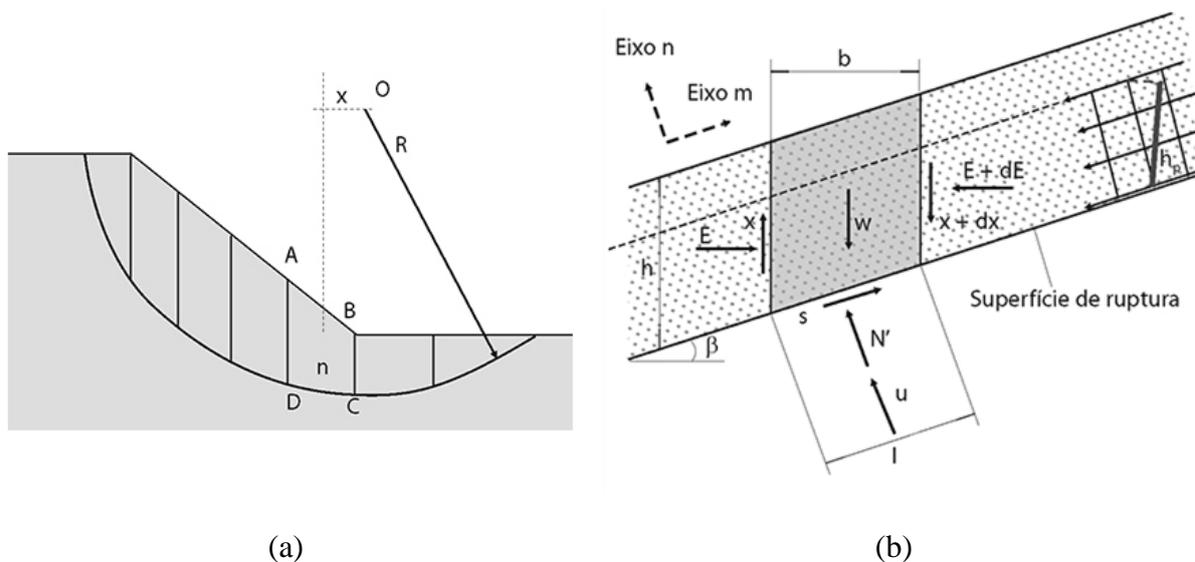


Figura 2.9. Ilustração dos modelos de cálculo da estabilidade: (a) Método de Equilíbrio Limite; e (b) Método do Talude Infinito.

Com o desenvolvimento computacional, o cálculo da estabilidade também pôde ser analisado por meio dos métodos numéricos, como o Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method - FEM*), que permitiu o cálculo de falha progressiva e segurança usando técnicas de redução de c' e ϕ' , além de análises de superfícies de plastificação e geração de estado de tensão para análise tipo equilíbrio limite (Batali & Andreea, 2016). Além disto, segundo Mascarenhas (2022) outras técnicas têm sido utilizadas, como por exemplo: a utilização de redes neurais artificiais (Shahin *et al.*, 2011) e a lógica *fuzzy* (Khan *et al.*, 2015).

Em estudos mais recentes, o suprimento das limitações de uma análise determinística de estabilidade de taludes vem sendo minimizadas pela utilização de uma análise probabilística. A abordagem probabilística aplicada à Geotecnia é caracterizada por considerar a variabilidade e as incertezas relacionadas aos parâmetros de cálculo nos problemas de engenharia, portanto acrescenta-se à função de desempenho (indicador de ruptura), a probabilidade de que o talude apresente um desempenho insatisfatório que possa levar à falha.

2.4.1 Principais tipos de deslizamentos de encostas

De acordo com Highland & Bobrowsky (2008), um movimento de massa é a locomoção de rochas, solos ou ambos, em movimento descendente que ocorre após a ruptura de uma superfície, podendo ser de forma curva (escorregamento rotacional) ou plana (escorregamento translacional). Todo o material que foi desprendido move-se como uma massa coerente ou semicoerente, com pequena deformação interna.

Os tipos de deslizamentos podem ter diferentes classificações com base na categoria de movimento e no tipo de material envolvido. Desta forma, o tipo de movimento descreve a mecânica interna de como a massa é deslocada, podendo ser divididos em: queda, envergamento, escorregamento, espalhamento ou escoamento. Na Figura 2.10- (a-f) podem ser observados os diferentes tipos de deslizamentos citados.

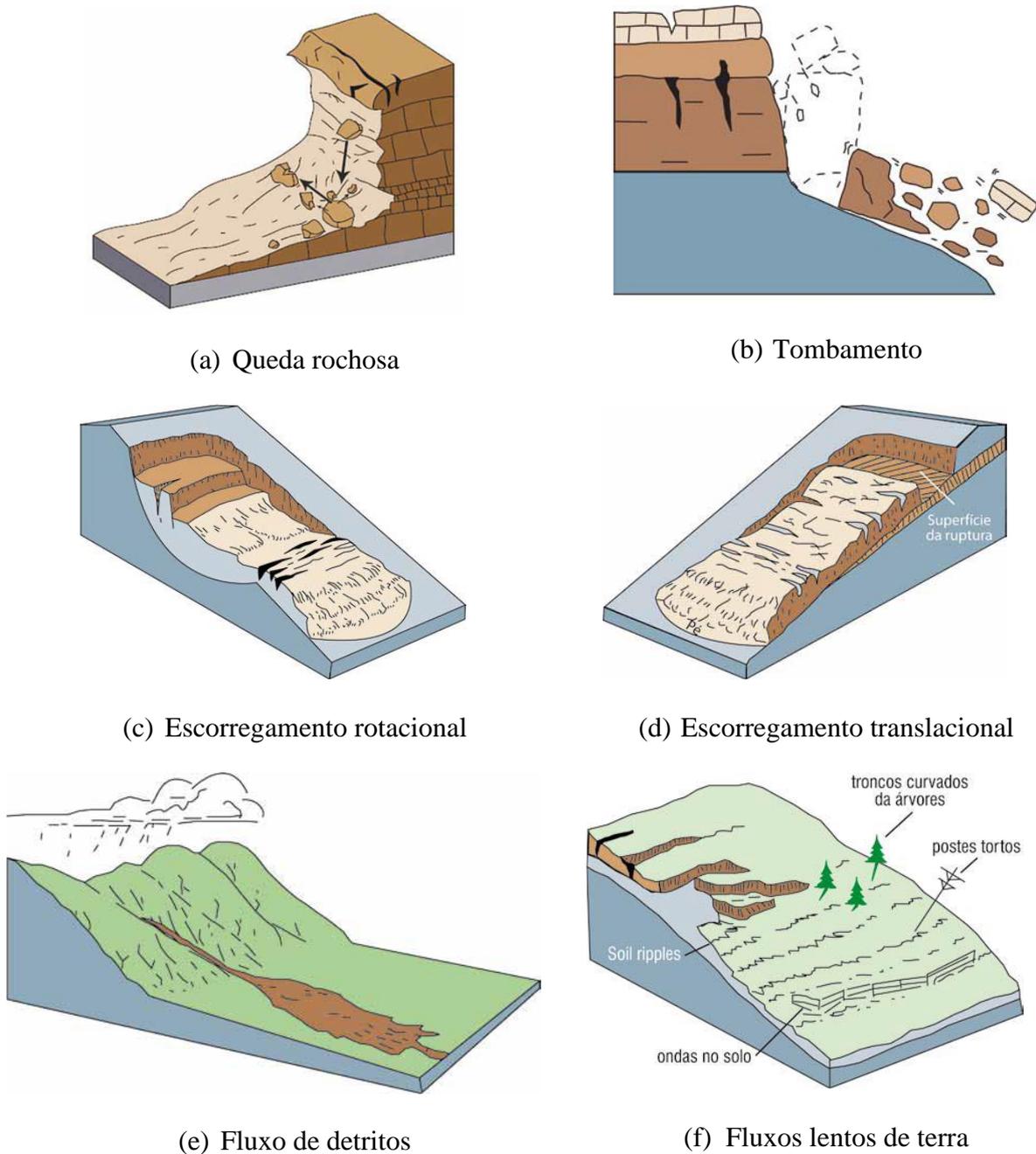


Figura 2.10. Esquema ilustrativo dos principais tipos de movimentos de massa: (a) queda rochosa; (b) tombamento; (c) escorregamento rotacional; (d) escorregamento translacional; (e) fluxo de detritos e; (f) fluxo lentos de terra. Fonte: Highland & Bobrowsky (2008).

Na Tabela 2.2 está descrito um resumo sobre os principais tipos de movimentos de massa, com a exposição de características, como: a ocorrência e tamanho, a velocidade de deslocamento e os mecanismos de desencadeamento.

Para dar continuidade ao referencial teórico desta tese, valendo-se dos conceitos apresentados no presente tópico, será discutido posteriormente, as principais características que podem indicar o princípio de um deslizamento, bem como as técnicas e os sistemas de monitoramento e instrumentos para a avaliação das condições físicas, mecânicas e hidráulicas dos taludes.

Tabela 2.2. Resumo das características sobre os principais tipos de deslizamentos. Fonte: Highland & Bobrowsky (2008).

Tipo	Conceito	Ocorrência e tamanho	Velocidade de Deslocamento	Mecanismo de desencadeamento
Quedas	Separação de solo ou rocha, ou ambos, de taludes íngremes, ao longo de sua superfície, onde tenha ocorrido pouco ou nenhum deslocamento por cisalhamento	Taludes íngremes ou verticais	Muito rápida ou extremamente rápida	Erosões regressivas do talude por processos naturais
Tombamento	Rotação frontal de uma massa de solo ou rocha para fora do talude, em torno de um ponto, ou eixo, abaixo do centro de gravidade da massa deslocada	Predominância em terreno de estrutura colunar vulcânica ou rocha sedimentar interdigitada e fissurada	Varia de extremamente lenta a extremamente rápida, às vezes com aceleração durante o movimento, dependendo da distância do deslocamento	Pode ser gerado pela gravidade exercida pelo material da parte superior da massa deslocada ou por água ou gelo presente em fissuras do interior da massa
Escorregamento Rotacional	A ruptura ocorre de modo curvo no sentido superior (em forma de colher) e o movimento da queda de barreira é mais ou menos rotatório em torno do eixo paralelo ao contorno do talude	Ocorre mais frequentemente em materiais homogêneos e possuem graus de inclinação de 20 a 40 graus	De muito vagarosa (menos de 0,3 m a cada 5 anos) a moderadamente rápida (1,5 m por mês) e a rápida	Chuva intensa e/ou contínua ou rápido degelo, escoamento rápido de rios após enchentes ou terremotos
Escorregamento Translacional	A massa corre para fora, ou para baixo e para fora, ao longo de uma superfície relativamente plana	Um dos tipos mais comuns de deslizamento, geralmente são mais rasos que os rotacionais. A superfície de ruptura possui razão entre a distância e a extensão de menos de 0,1 e pode variar de pequena a muito grande	Pode ser inicialmente vagaroso (1,5 m por mês), pode ter velocidade moderada (1,5 m por dia) ou extremamente rápidos	Chuva intensa, aumento da saturação do solo pelas chuvas, degelo, inundações, aumento do nível de água por irrigações, vazamentos de tubulações, terremotos
Fluxo de Detritos	O solo solto e rochas, podendo conter matéria orgânica, se misturam à água e formam lama que escoam pelo talude abaixo	Cânions e ravinas íngremes, sendo mais comuns em áreas cuja vegetação tenha sido destruída	O movimento pode ser rápido a extremamente rápido (56 km/h), dependendo da consistência e do ângulo de inclinação	Fluxo intenso de água na superfície, devido a chuva pesadas ou degelo rápido que causam erosões e movimentam as rochas e o solo solto
Fluxos Lentos de Terra (Rastejos - <i>Creep</i>)	Movimento vagaroso, imperceptível e contínuo, para baixo do solo que forma o talude. Podem ter três tipos: sazonal, contínuo e progressivo	Ocorrem por todo o planeta e frequentemente precede outros tipos de deslizamentos mais rápidos e danosos. Podem ser regionais ou limitados a pequenas áreas	Muito veloz a extremamente lento, geralmente menos de 1 m por década	Para rastejos sazonais as causas são a chuva e o degelo. Para os demais, podem ser causadas pelas condições climáticas, químicas ou físicas, vazamento de tubulações, drenagem insuficiente, tipos de construções desestabilizadoras, etc.

2.4.2 Ferramentas e técnicas para a avaliação e prevenção de deslizamentos

O princípio de um movimento de massa necessita de um processo indutor, responsável por promover o fenômeno que é mais conhecido como gatilho do deslizamento (*landslide trigger*). Esses gatilhos referem-se aos estímulos externos induzidos por chuvas intensas, rápido degelo, movimentos sísmicos, erupções vulcânicas, erosões superficiais ou processos de falhas em barragem, que podem causar efeitos imediatos ou retardados nos taludes (Schuster & Wieczorek, 2002).

Conforme o Highland & Bobrowsky (2008), existem algumas características nos taludes, detectadas por meio de inspeções visuais, que podem indicar o princípio de um deslizamento. Estas características englobam processos, como:

- Elevado grau de saturação, presença de nascentes, solo úmido ou infiltrações em áreas previamente secas na base de taludes;
- Presença de rachaduras na neve, no gelo, no solo ou rochas e, também, no cume dos taludes;
- Distanciamento de calçadas ou lajes que anteriormente se encontravam próximas aos declives;
- Desalinhamento de cercas em relação ao prumo;
- Presença de protuberâncias incomuns ou aparecimento de degraus no chão, calçamentos, passeios ou calçadas;
- Ocorrência de inclinações em postes, árvores ou cercas.
- Presença de inclinação ou rachaduras excessivas no piso ou fundações;
- Ocorrência de danos em tubulações de água ou em estruturas subterrâneas;
- Ocorrência de rápida elevação ou rebaixamento dos níveis d'água, com consequente aumento de turbidez (teor de turvação da água pelo solo);
- Ocorrência de emperramento de portas e janelas, aparecimento de trincas e fissuras nas edificações, indicando que paredes e molduras estão se deformando;
- Ocorrência de rangidos, estalos ou ruídos nas edificações, indicando movimentação das estruturas, ou até mesmo em declives vegetados, podendo ser indicativo de movimentações no solo, pelo rompimento de raízes;
- Presença de afundamentos ou inclinações descendentes;
- Ocorrência de quedas de estradas ou caminhos;

Além da inspeção visual, que tem sido importante para a mitigação dos efeitos causados pelos deslizamentos, técnicas e instrumentos se apresentam como uma alternativa mais eficaz

de prevenção, devido a precisão e a confiabilidade das tecnologias que vêm sendo implantadas para esta finalidade.

Segundo Angeli *et al.* (2000), desde 1982 tem sido realizadas investigações geotécnicas para a detecção das condições de estabilidade de encostas para diferentes contextos geológicos e ambientais, para o desenvolvimento de técnicas de monitoramento. Neste sentido, o monitoramento do fenômeno natural tem auxiliado no entendimento de aspectos chave, incluindo as propriedades dos solos e rochas, a geomorfologia e os tipos de movimentos, além da quantificação das taxas de velocidade dos deslizamentos (Whiteley *et al.*, 2019).

De acordo com Marr (2013), ocorreu um aumento de programas de monitoramento geotécnico para o acompanhamento do desempenho real de taludes e verificação se os limites estão dentro do previsto pelos projetistas, principalmente em taludes rodoviários, ferroviários, de mineração ou em barragens e em terrenos montanhosos habitados. Desta forma, com este acompanhamento a pretensão é de que o comportamento inesperado possa ser identificado com antecedência suficiente para que ações sejam tomadas para a manutenção da segurança da estrutura, do controle de custo e do cronograma de projeto.

Para tanto, a escolha dos equipamentos para a instrumentação geotécnica se inicia pela definição de uma finalidade de análise, em seguida é necessária a determinação de quais parâmetros serão medidos para o alcance deste objetivo, por fim, pela busca dos equipamentos. Zanol *et al.* (2000) indica em seu trabalho as situações nas quais é recomendado o uso de instrumentos para o monitoramento de taludes e encostas, que são: para a determinação da forma da superfície de ruptura e sua profundidade, para a verificação dos movimentos horizontais e verticais, além da velocidade do movimento, no acompanhamento das poropressões e níveis d'água, no monitoramento de medidas de controle e, também para o fornecimento de um sistema de alerta remoto contra prováveis desastres (Nichel, 2011).

Conforme Kane & Beck (2000), o monitoramento remoto utilizando instrumentação eletrônica pode ser uma abordagem efetiva para muitos taludes instáveis ou potencialmente instáveis. Neste contexto, alguns parâmetros, como: as flutuações do nível d'água e a pressão exercida pela água podem ser observadas usando indicadores de nível d'água (INA) ou piezômetros, respectivamente; os movimentos e as deformações podem ser determinados com o uso de inclinômetros, acelerômetros e extensômetros; os teores de umidade podem ser medidos por sensores de umidade e TDR's (*Time domain reflectometry*); e as medições de pressões negativas, de sucção podem ser feitas por meio de tensiômetros.

Vale enfatizar que, em geral, a utilização destes sensores necessita de um equipamento auxiliar para a realização do armazenamento e/ou a transmissão de dados. Este aparelho aquisitor é denominado *data logger* e a sua função de armazenamento e transmissão é essencial para locais remotos, onde o acesso para a coleta física de dados é prejudicada.

Entretanto, com o avanço tecnológico da telecomunicação, telemetria e dos equipamentos a partir da revolução tecnológica trazida pela *Indústria 4.0*, existe hoje no mercado diversas opções de aparelhos com tecnologia *IoT (Internet of Things)*, que permitem a transmissão de dados via *Internet*, além de *softwares* computacionais para a plotagem rápida de dados, possibilitando o acompanhamento em tempo real dos dados de campo e, para muitos casos, possibilitando o envio de avisos imediatos em caso de falha.

Para detalhar separadamente os sensores que serão utilizados na instrumentação do modelo físico, estas informações serão melhor esclarecidas no item 3.4 do Capítulo 3 Metodologia.

2.5 Modelos reduzidos de representação física de taludes

A complexidade e a dificuldade de representação matemática dos fenômenos associados a instabilidade em encostas não saturadas, provocada por eventos de precipitação, determinam geralmente a necessidade de recorrer ao campo experimental, apesar do contínuo aperfeiçoamento de recursos computacionais e técnicas de modelagem matemática.

A necessidade de esclarecimento de questões e a busca de melhor compreender o comportamento do fenômeno físico, motiva a execução de ensaios e/ou a criação de equipamentos para simular o comportamento e observar as nuances do fenômeno que são, muitas vezes, incompreendidas somente com base nas teorias matemáticas.

Neste contexto, mais especificamente para o estudo da estabilidade de taludes, os modelos físicos consistem na representação destas estruturas geotécnicas, em menor escala, e são fundamentados em leis de semelhança que possibilitam a reprodução tão semelhante quanto possível, das características físicas, mecânicas e hidráulicas de um talude real.

2.5.1 Leis de semelhança e modelagem

O conceito de similitude, segundo Szücs (1980), tem ocupado uma posição de considerável importância nos questionamentos humanos, pois a rigor, cada fenômeno (cada objeto) do universo difere de todos os outros, portanto, não há dois totalmente iguais.

Assim, a partir da premissa de que nenhum fenômeno é idêntico a si mesmo, se considerado em dois instantes de tempo distintos, este pensamento implica que a cognição de uma tal afinidade de fenômenos diferentes se torna impossível. Porém, ainda como discorre

Szücs (1980), a tendência do pensamento humano é recorrer à generalização ou a abstração para a compreensão dos fenômenos da natureza.

Desta forma, a elaboração de conceitos é, em essência, um agrupamento ou uma classificação por características essenciais comuns que desconsidera as diferenças irrelevantes. Assim, os elementos pertencentes a um determinado conjunto têm, então, pelo menos uma propriedade em comum: são semelhantes nas suas propriedades comuns (também chamadas de características comuns) (Szücs, 1980).

É importante se atentar ainda ao pensamento lógico de Szücs (1980), que faz um exercício de comparação entre duas sentenças e afirma que ambas são idênticas no conteúdo:

— *objetos diferentes pertencem a um conjunto comum se tiverem pelo menos uma propriedade comum;*

— *objetos diferentes são semelhantes se tiverem pelo menos uma característica comum.*

A conclusão do autor é simples: a semelhança depende de um ponto de vista que deve ser declarado. Neste sentido, as propriedades em análise é que irão especificar a semelhança.

Portanto, como fora discutido, Szücs (1980) evidencia que a semelhança satisfaz as seguintes condições:

(a) $A \sim A$, ou seja, A é semelhante a si mesmo;

(b) $A \sim B$, então também $B \sim A$, isto é, se A é semelhante a B, então B é semelhante a A também;

(c) $A \sim B$ junto com $B \sim C$, o que implica $A \sim C$: isto é, se A for semelhante para B e B para C, então A é semelhante a C.

Finalmente, tem-se que a semelhança é reflexiva (a), simétrica (b) e transitiva (c). Portanto, a similitude é uma relação de equivalência.

Neste contexto, a aplicação das leis de semelhança na modelagem física possibilitou a reprodução de fenômenos físicos para o auxílio no processo de análise e interpretação de problemas complexos.

De acordo Murphy (1950) citado por Jentzsch (2002), os modelos podem ser divididos em quatro tipos, sendo os *modelos verdadeiros*, em que todas as características relevantes são produzidas em escala e obedecem aos critérios de projeto e condições de operação; os *modelos adequados*, que permitem uma previsão acurada de uma característica, mas que esta previsão não se aplica a outras características; *modelos distorcidos*, ocorrem quando algumas premissas são violadas, tornando necessária a correção da equação de predição; e os *modelos dissimilares*,

que são aqueles em que o original (protótipo) e o modelo apresentam qualidades físicas básicas distintas, mas têm em comum características funcionais e estruturais.

Para a compreensão de uma técnica utilizada na teoria da semelhança, denominada de *análise dimensional*, primeiramente recorre-se à conceituação de *análise fracionária*. Stephen J. Kline em seu livro, *Similitude and Approximation Theory*, explica que uma análise fracionária é qualquer procedimento para a obtenção de alguma informação sobre a resposta a um problema, na ausência de métodos ou de tempo para encontrar uma solução completa. Esta informação pode ser assentada em uma simples lista de alguns parâmetros pertinentes ou até em uma equação diferencial complexa e suas condições de contorno (Kline, 1986).

Todavia, independentemente do nível de sofisticação e complexidade, de acordo com Kline (1986) uma análise fracionária quase sempre utiliza, tanto uma informação física, como uma análise matemática. O objetivo de uma análise fracionária é sempre de obter o máximo de informação possível, mesmo que não consigamos encontrar a solução completa e exata. Assim, tem-se que o método mais conhecido e amplamente utilizado para estas análises fracionárias é, então, a análise dimensional.

Neste sentido, para que os conceitos a respeito do presente tópico não fiquem muito amplos e generalizados, será discutido mais detalhadamente nesta tese, a respeito da análise dimensional, conhecida pelo Teorema II de Buckingham (1914), conforme descrito por Heller (2011).

Conforme o teorema, um problema físico com n parâmetros independentes q_1, q_2, \dots, q_n pode ser reduzido para um produto de $n - r$ parâmetros adimensionais independentes $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-r}$, com r sendo o número mínimo de referências dimensionais (comprimento [L], massa [M] e o tempo [T]) requerido para descrever as dimensões dos n parâmetros.

Portanto, para alcançar a similaridade, para cada um dos parâmetros adimensionais, quantitativamente, tem de haver uma concordância entre modelo e protótipo. Portanto, conforme postulado citado por Heller (2011), tem-se que dois sistemas serão semelhantes se obedecerem a similaridade mecânica, que consiste nas: geométrica, cinemática e dinâmica; além de que estas condições somente serão satisfeitas se ambos os sistemas forem ainda, tornados geometricamente semelhantes e se as proporções de todas as forças pertinentes forem iguais nos dois problemas.

Segundo Zohuri (2015), construir um modelo em escala, deve ser acompanhado por análises de similitude para determinar sob quais condições o modelo será testado. Enquanto que a semelhança geométrica pode ser mais facilmente escalada, outros parâmetros, como

temperatura, pressão ou velocidade e o tipo de fluido podem precisar ser alterados. A similitude é então alcançada quando as condições testadas são criadas para que os resultados encontrados sejam aplicáveis ao projeto real.

No campo dos modelos mecânicos e hidráulicos, como em um modelo de caixa de areia, um modelo físico em escala será completamente similar ao do protótipo - entende-se protótipo como o sistema do mundo real (original) - quando o modelo satisfizer a similaridade mecânica por meio dos critérios (Novak, 1984, Heller, 2011, Zohuri, 2015):

- a. *Similaridade Geométrica;*
- b. *Similaridade Cinemática;*
- c. *Similaridade Dinâmica.*

a. Similaridade Geométrica

A *similaridade geométrica* consiste no modelo apresentar o mesmo formato do protótipo, geralmente em escala. Basicamente, pode-se afirmar que a similitude geométrica existirá entre o modelo (*m*) e o protótipo (*p*) se as proporções de todas as dimensões correspondentes no modelo e no protótipo forem iguais e, matematicamente puderem ser apresentadas, como:

$$\frac{L_{\text{modelo}}}{L_{\text{protótipo}}} = L_{\text{razão}} \text{ ou } \frac{L_m}{L_p} = L_r \quad (2.10)$$

$$\frac{A_{\text{modelo}}}{A_{\text{protótipo}}} = \frac{L_{\text{modelo}}^2}{L_{\text{protótipo}}^2} = L_{\text{razão}}^2 = L_r^2 \quad (2.11)$$

onde, *L* é o comprimento [L], e *A* é a área [L²].

Em suma, a similaridade geométrica implica na semelhança de forma, em que a razão entre qualquer comprimento de um sistema em relação a outro sistema correspondente, tem de ser a mesma para todos os lugares. Portanto, esta relação, que é de importante conhecimento para a teoria da semelhança, é chamada de *fator escala*. Alguns objetos simetricamente similares podem ser observados na Figura 2.11.

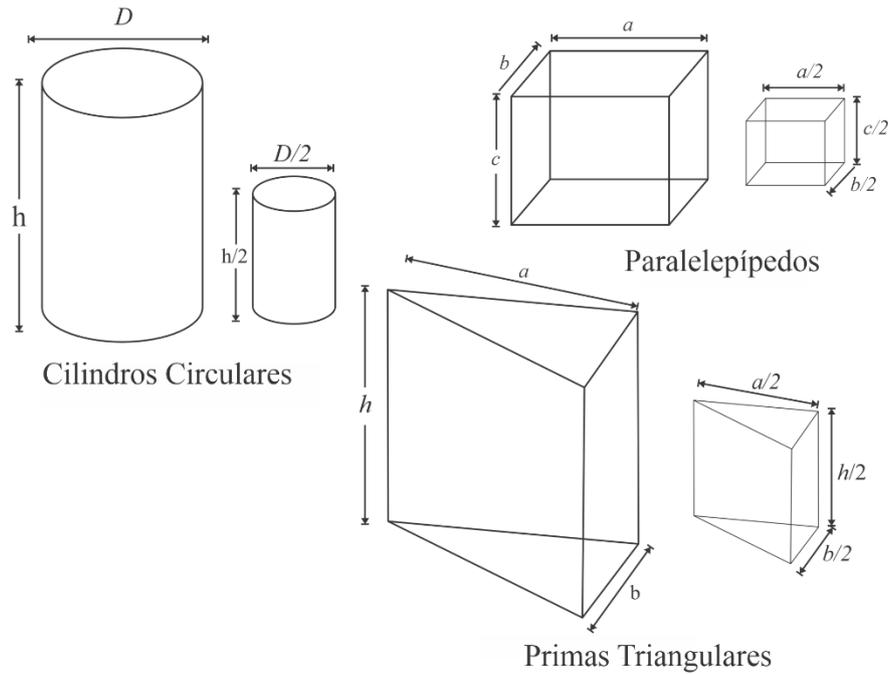


Figura 2.11. Objetos geometricamente similares com fator escala de $\frac{1}{2}$. Fonte: modificado de Zohuri (2015)

b. Similaridade Cinemática

A *similaridade cinemática* refere-se à semelhança de movimento. Visto que o movimento é descrito pela distância e tempo, isso implica na semelhança de comprimentos (geométrica) e, além disto, na semelhança de intervalos de tempo. Isto requer razões constantes de tempo, velocidade, aceleração e descarga entre modelo e protótipo para todos os tempos.

Portanto, segundo Zohuri (2015), pode-se inferir que se os comprimentos correspondentes nos dois sistemas estiverem em uma razão constante, então as velocidades das partículas correspondentes deverão estar também em uma proporção fixa de magnitude nos respectivos intervalos de tempo.

Desta forma, se a razão dos comprimentos correspondentes for igual a L_r , conhecida como fator escala (Eq. 2.10), e conseqüentemente, a razão dos intervalos de tempo for igual ao fator escala do tempo (T_r), então os módulos das velocidades estarão na razão de L_r/T_r e os módulos das acelerações correspondentes também serão de L_r/T_r^2 .

Velocidade:
$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{L_m/T_m}{L_p/T_p} = \frac{L_m}{L_p} \cdot \frac{T_p}{T_m} = \frac{L_r}{T_r} \quad (2.12)$$

$$\text{Aceleração:} \quad \frac{a_m}{a_p} = \frac{L_m/T_m^2}{L_p/T_p^2} = \frac{L_m}{L_p} \cdot \frac{T_p^2}{T_m^2} = \frac{L_r}{T_r^2} \quad (2.13)$$

$$\text{Descarga:} \quad \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{L_m^3/T_m}{L_p^3/T_p} = \frac{L_m^3}{L_p^3} \cdot \frac{T_p}{T_m} = \frac{L_r^3}{T_r} \quad (2.14)$$

onde, V é a velocidade [LT^{-1}], a é a área [L^2], T é o tempo [T] e Q é a descarga [L^3T^{-1}].

Em resumo, a similaridade cinemática é verdadeira quando as trajetórias das partículas homólogas em movimento, são geometricamente similares e quando as razões das velocidades destas mesmas partículas são iguais.

c. Similaridade Dinâmica

A *similaridade dinâmica* é a similaridade de forças. Para que esta semelhança seja verdadeira é necessário que o modelo obedeça às similaridades geométrica e cinemática, para que todas as razões de força no sistema *modelo-protótipo* sejam idênticas. Assim, em sistemas dinamicamente semelhantes, as magnitudes das forças em pontos correspondentemente semelhantes nestes sistemas, tem de estar em uma proporção fixa.

Neste sentido, as forças mencionadas para a determinação da similaridade dinâmica, são: pressão, gravidade, atrito ou viscosidade, elasticidade e tensão superficial. Além disso, também devem ser conhecidas as propriedades físicas envolvidas no sistema, que são: a densidade, a viscosidade, a elasticidade, entre outras propriedades.

Segundo Hughes (1993) e Heller (2011), na dinâmica dos fluidos, o conjunto de forças mais relevantes, são:

$$\text{Força inercial} = \text{massa} \times \text{aceleração} \quad \left(\rho L^3\right) \left(\frac{V^2}{L}\right) = \rho L^2 V^2 \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \text{Força gravitacional} &= \text{massa} \\ &\times \text{aceleração da gravidade} \end{aligned} \quad \rho L^3 g \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \text{Força viscosa} &= \text{viscosidade dinâmica} \\ &\times (\text{velocidade/distância}) \times \text{área} \end{aligned} \quad \mu V L \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \text{Força de tensão superficial} &= \text{unidade} \\ &\text{de tensão superficial} \times \text{comprimento} \end{aligned} \quad \sigma_s L \quad (2.18)$$

$$\begin{array}{l} \text{Força de compressão elástica} = \text{módulo} \\ \text{de Young} \times \text{área} \end{array} \qquad EL^2 \qquad (2.19)$$

$$\begin{array}{l} \text{Força de pressão} = \text{unidade pressão} \\ \times \text{área} \end{array} \qquad p_r L^2 \qquad (2.20)$$

onde, ρ é a densidade [ML^{-3}], g é a aceleração da gravidade [LT^{-2}], μ é a viscosidade dinâmica [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$], σ_s é a tensão superficial [MT^{-2}], E é o módulo de Young [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$] e p_r é a pressão [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$].

Para concluir, conforme afirma Zohuri (2015), uma semelhança estritamente correspondente, muitas vezes, é impossível alcançar durante um teste de um modelo. Portanto, deve-se ficar claro que quanto maior for o desvio das condições de operação de aplicação, mais difícil será alcançar a similitude. Todavia, para estas situações, alguns aspectos de semelhança podem ser negligenciados e o foco deve ser concentrado apenas nos parâmetros mais importantes.

2.5.2 Efeito Escala e suas implicações

Efeitos escala resultam em desvios entre as medições ampliadas ou reduzidas dos modelos e as observações do protótipo, devido aos parâmetros do protótipo que não foram dimensionados corretamente para a escala adequada, resultando em relações geométrica, cinemática e dinâmica que não são idênticas entre ambos (Heller, 2011).

Em outras palavras, esses desvios observados podem caracterizar distorções no modelo que, conseqüentemente, podem ter efeitos insignificantes no protótipo, porém significantes dadas à escala do modelo. Esta diferença pode implicar na mudança de comportamento esperado para o modelo, desviando do propósito de construção de modelos que é a de representar o comportamento do fenômeno real.

Entretanto, conforme explica Sutherland *et al.* (1999), para estudo da distorção em modelos do ponto de vista de projeto, alguns *efeito escala* podem ser permitidos, utilizando o conhecimento prévio de experimentação para o fornecimento de parâmetros de engenharia. Desta maneira, a realização de experimentos em uma variedade de sistemas em escala tem o objetivo de aplicação dos resultados encontrados para a determinação matemática e verificação de uma explicação teórica que um modelo seja distorcido.

Segundo Heller (2011), no processo de elaboração de um modelo reduzido, independente do fenômeno investigado, devem ser consideradas os quatro itens seguintes, sendo eles:

- 1) Testes em modelos físicos hidráulicos sempre irão envolver efeitos escala, se o fator escala for diferente de 1, uma vez que é impossível modelar corretamente todas as relações de força de um fenômeno. Portanto, o questionamento principal que o projetista deve definir é se estes efeitos podem ou não ser negligenciados.
- 2) Quanto maior for o fator escala, maiores serão os desvios das razões de força do *modelo-protótipo* e, conseqüentemente, espera-se maiores efeitos escala.
- 3) O tamanho do efeito escala depende do fenômeno investigado ou do parâmetro em um modelo, uma vez que a importância relativa das forças envolvidas pode diferir. Em outras palavras, cada parâmetro envolvido requer uma análise própria em relação ao efeito escala provocado.
- 4) Dado que as forças dos fluidos em um modelo são mais dominantes que no fenômeno real, os *efeitos escala* normalmente causam um efeito chamado de “*damping effect*” (efeito de amortecimento). Desta forma, geralmente é possível avaliar se a previsão baseada no modelo subestima ou superestima o valor do protótipo.

2.5.3 Histórico da modelagem física de taludes

O Comitê Técnico da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ISSMGE) (TC104) preconiza que a modelagem física é “uma representação física simplificada de um problema de fronteira finita para o qual a similaridade é buscada no contexto de leis de escala” (Al Heib *et al.* 2019).

Historicamente, os modelos em escala foram amplamente utilizados em muitos ramos da engenharia para conduzir experimentos que seriam difíceis de realizar no protótipo. De acordo com Wood (2006), a modelagem física é geralmente utilizada para compreender o comportamento de protótipos.

Com o rápido desenvolvimento de *hardwares* e *softwares* computacionais, o uso de modelos em escala diminuiu, na medida em que os modelos digitais tiveram um amplo crescimento, devido à sua maior aceitabilidade como um método mais eficaz de investigação de projeto e validação de um protótipo.

Contudo, existem casos, conforme explica Wellstead (1980), em que os modelos computacionais são incapazes de reproduzir adequadamente o fenômeno real que se deseja simular. Desta forma, recorreu-se novamente à utilização de modelos em escala.

As principais vantagens da utilização de um modelo físico em pequena escala, segundo Al Heib *et al.* (2019), está na sua simplicidade e custo limitado, a possibilidade de obtenção do

comportamento de estruturas ou processos complexos e de fornecimento de dados experimentais para a validade de modelos numéricos ou analíticos.

Um modelo físico representa um protótipo em escala e é utilizado como uma ferramenta para encontrar soluções ótimas, tanto economicamente, quanto tecnicamente viáveis para problemas de engenharia (Pfister & Chanson, 2012). Todavia, os modelos físicos reduzidos podem ser afetados por incertezas, em virtude dos efeitos de escala que podem aumentar conforme o *fator escala*, mas que podem ser minimizados com a adoção de parâmetros e características mais próximas quanto possível das condições reais. Portanto, a escolha de um modelo físico depende da razão de similaridade desejada do protótipo, seja de grande para pequena escala e de $1g$ (condições normais de gravidade) para ng (obtida com a utilização de centrífugas).

Al Heib *et al.* (2019) esclarecem que um modelo físico de gravidade unitária ($1g$) apresentam geralmente três características principais: (1) o modelo físico fornece uma fonte de dados confiáveis para auxiliar na modelagem numérica e na retroanálise, uma vez que as condições de contorno são bem definidas e controladas; (2) o tamanho do modelo pode ser bastante grande para que a escala linear do modelo seja pequena e; (3) o cumprimento total das leis de semelhança, geralmente, é impossível.

Neste contexto, Altaee & Fellenius (1994) alertam sobre a compatibilidade entre modelo-protótipo e apontam lacunas em muitos trabalhos nos quais não são mencionadas as relações de escala e, nem mesmo sugerem como os resultados obtidos podem ser traduzidos para o comportamento das estruturas do protótipo. Isto incute a percepção de que os mecanismos observados são no mínimo, qualitativamente representativos para o protótipo e a extrapolação do comportamento para uma escala real, em muitos casos, não é confiável.

Desta forma, enfatiza-se que em trabalhos voltados para a concepção de modelos físicos a $1g$, devem ser consideradas as limitações de análise. Conforme explica Al Heib *et al.* (2019), estas limitações ocorrem em razão das tensões *in situ*, que não podem ser representadas de forma realista. Por outro lado, a modelagem física com gravidade ng (centrífuga) é baseada no aumento artificial da gravidade, por meio de uma centrífuga que induz a obtenção da verdadeira similaridade da relação tensão-deformação entre modelo e protótipo. Neste processo, é possível a replicação das tensões de solo da escala real (protótipo) nos modelos reduzidos. Portanto, fica garantida a similaridade, uma vez que o comportamento do solo é em função do nível de tensão.

Apesar das limitações, modelos físicos a $1g$ são amplamente utilizados em diversos estudos, devido à economicidade em relação à modelagem com utilização de centrífuga,

fornecendo meios mais acessíveis para obter dados de testes para validação de modelos numéricos.

Dessa forma, afim de contextualizar o objeto desta tese ao que foi explanado sobre modelos físicos em escala, será apresentado o estado da arte da modelagem física em taludes com foco íntegro em modelos 1g, a fim de apresentar as importantes contribuições anteriores à esta pesquisa e ao campo da modelagem física experimental.

Após uma profunda investigação, concluiu-se que o histórico da modelagem física em taludes é relativamente recente e tem sido utilizada por diversos autores com objetivos e finalidades diferentes. Desta forma, neste documento será apresentado um histórico detalhado e, ao fim deste item, um quadro comparativo para o conhecimento das contribuições de alguns dos principais autores deste ramo de estudo (Tabela 2.3).

Assim, foram selecionados cinco autores com maior destaque e congruência com esta tese, em que seus trabalhos serão apresentados e discutidos em seguida, como: Orense *et al.* (2004), Tohari *et al.* (2007), Schnellmann *et al.* (2010), Egeli & Firat Pulat (2011) e Pajalić *et al.* (2021).

Modelo Físico de Orense *et al.* (2004)

Orense *et al.* (2004) investigam as condições que levam um talude à falha causada pela rápida elevação da poropressão como resultado do processo de infiltração registradas durante um evento chuvoso, ou em momentos imediatamente posteriores. Entretanto, apesar dos avanços realizados no campo da modelagem física de taludes, segundo os autores, fatores importantes que influenciam no processo inicial da falha ainda precisam ser melhor esclarecidos.

Neste sentido, para investigar esses fatores, os autores conduziram uma série de experimentos de laboratório em um modelo físico de talude arenoso para determinar o processo inicial de falha provocada pela chuva. Para tanto, as amostras de solo utilizadas foram obtidas de um ponto de *Omigawa* (localizada na região nordeste da Península do *Boso* no Japão), onde neste local foram reportados mais de 250 deslizamentos de terra. Conforme as informações ilustradas na Figura 2.12, o solo foi caracterizado como sendo um silte arenoso, contendo somente 9% de finos, classificados como não-plásticos (NP).

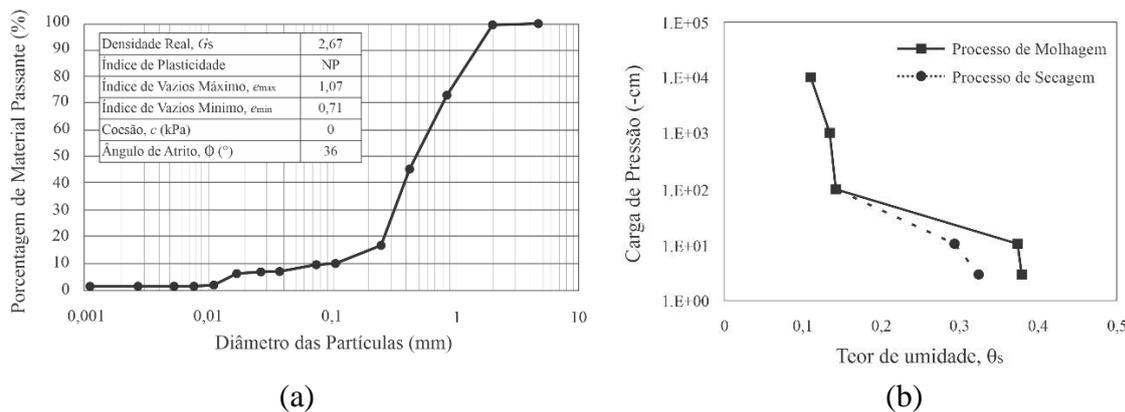


Figura 2.12. Propriedades do solo de *Omigawa* no Japão. Fonte: Modificado de Orense *et al.* (2004).

Quanto à caixa experimental, os autores descrevem que foi utilizado um tanque de dimensões de 220 cm de comprimento, 80 cm de largura e 100 cm de altura, com as paredes produzidas de placas de aço, exceto à da região frontal, que foi produzida com uma placa de acrílico para facilitar a visualização do experimento nos processos de deformação. É importante acrescentar que neste trabalho os autores não informaram a escala do projeto da caixa experimental, sendo o trabalho citado apenas como modelo de talude em pequena escala (*small-scale model slope*).

O tanque foi dividido em 03 seções, sendo: a porção central com 197 cm de comprimento, que foi utilizado para construir o talude e as porções esquerda e direita com 11,5 cm cada, utilizados para suprir e drenar água. O esquema ilustrativo e a fotografia do tanque experimental podem ser visualizados na Figura 2.13- (a-b).

Quanto aos sensores utilizados, foram aplicados para o monitoramento: duas configurações de medidores de poropressão, sendo um com capacidade de 20 kPa e outro de 100 kPa; transdutores de umidade utilizados foram do tipo ADR (*Amplitude Domain Reflectometry* - Reflectometria no Domínio da Amplitude) e transdutores de deslocamento. Além disso, duas câmeras foram posicionadas estrategicamente para a captação do desenvolvimento do processo de falha.

A respeito do programa experimental, foram construídos taludes com solo homogêneo, a partir da sobreposição de camadas horizontais a uma umidade inicial de $w_i = 10\%$. Para isto, a compactação foi realizada igualmente, camada a camada, com uma haste compactadora para a obtenção da altura total prescrita para o talude. Além disso, os sensores locados para determinadas posições, foram instalados conforme foram realizadas o alteamento das camadas.

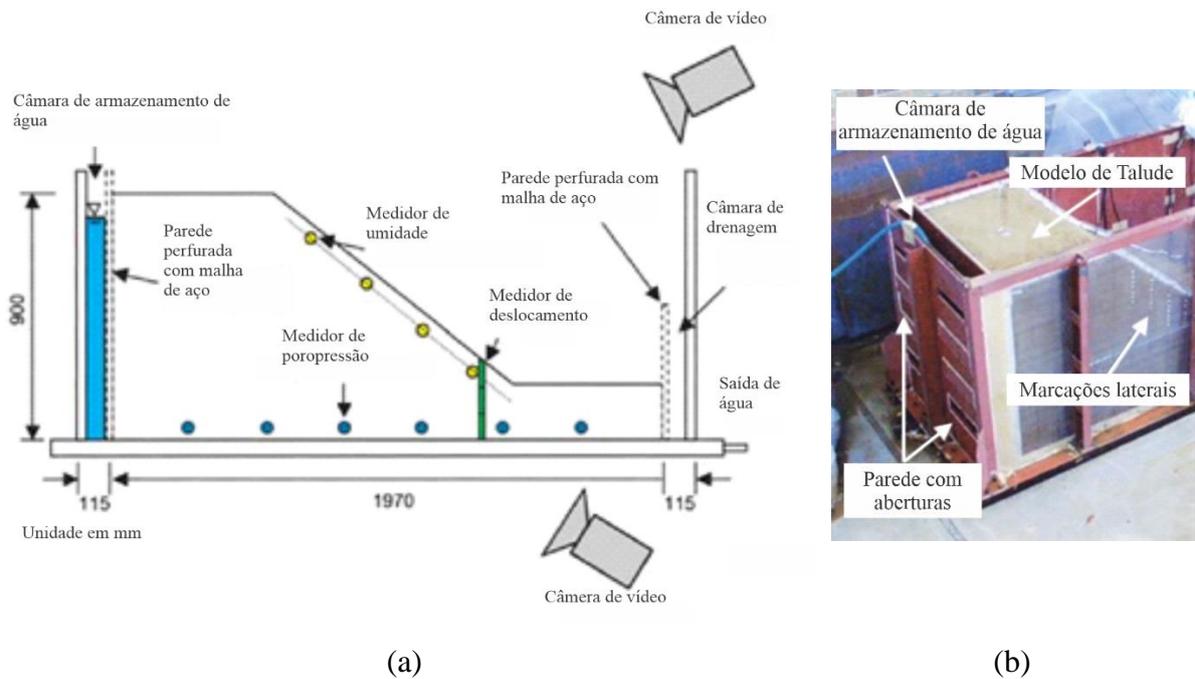


Figura 2.13. Esquema ilustrativo e fotografia do tanque experimental. Fonte: Modificado de Orense *et al.* (2004).

Os autores destacam que foram efetuados dois tipos diferentes de configuração de modelos, sendo que foram analisados: os efeitos da densidade relativa inicial (D_r), a inclinação do talude (α), a configuração do talude e a percolação.

Posteriormente, nos modelos foram simulados testes de percolação e precipitação. Para isto, na simulação de percolação, o nível d'água da câmara lateral foi preenchida até uma altura de 80 cm e mantida neste nível com o objetivo de reproduzir o fluxo subterrâneo. Além disto, para induzir a infiltração no topo do declive foi reproduzida uma chuva artificial constante no tempo e no espaço, por meio de mangueiras e bicos de saída. A determinação da intensidade de chuva foi determinada por meio da coleta de água de chuva acumulada, medida periodicamente, com chuvas medidas de 70 – 96 mm/h, 154 mm/h, 80 – 262 mm/h e 42 – 72 mm/h.

Os resultados experimentais obtidos, por meio dos testes de percolação e precipitação, possibilitaram a reprodução de dois processos diferentes de infiltração. Desta forma, os autores concluem que em ambas as simulações, a ruptura do talude foi induzida pela elevação da poropressão, de acordo com a subida do nível d'água no interior do talude. Além disto, os autores inferem que o processo de saturação reduziu significativamente as tensões efetivas e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento do solo. Em resumo, foi concluído que as mudanças nas tensões causadas pela resposta hidrológica, foram os responsáveis pelo início do processo de instabilidade no talude para todos os cenários analisados.

Modelo Físico de Tohari et al. (2007)

O trabalho desenvolvido por Tohari *et al.* (2007) possui um desenvolvimento interessante ao propor uma análise baseada na compreensão do processo de falha para a concepção de sistemas de alerta. Para isto, os autores propuseram uma série de ensaios em um talude de solo (escala laboratorial), submetendo-o a processos de instabilidade, por meio da elevação do nível d'água, com o intuito de verificar o momento pré-falha.

Para a construção do modelo de talude de solo foram utilizados dois solos arenosos diferentes, sendo um solo proveniente de areia de rio e um solo granítico residual. Quanto ao aparato experimental, o projeto foi desenvolvido em um tanque formado por placas metálicas de dimensões de 2,0 x 1,0 x 1,5 m e, para a observação do comportamento do talude durante o ensaio, uma placa de acrílico de espessura de 20 mm foi instalada em um dos lados do tanque. Destaca-se que para este trabalho não foi citada nenhuma informação a respeito da utilização das leis de semelhança para a concepção do projeto.

O sistema de instrumentação do modelo contou apenas com 04 (quatro) sensores de umidade e um microcomputador para a aquisição de dados. Os sensores foram posicionados em locais pré-determinados através de pequenos furos efetuados na parede de acrílico. Quanto ao simulador de chuva, as mangueiras foram posicionadas cerca de 1,0 m sobre o modelo de talude e configuradas para proporcionar uma intensidade de chuva de 100 mm/h.

A respeito do programa experimental, os primeiros dois experimentos foram focados na determinação dos efeitos sobre o modelo de talude de diferentes taxas de elevação nos níveis d'água no processo de falha e na mudança no teor de umidade. Para a produção de percolação no primeiro experimento, foi mantida uma coluna de água de altura constante de 5 cm na primeira hora e após isso, esta foi elevada até 65,5 cm. No segundo experimento, foi examinada uma condição de rápida elevação da coluna, a partir de uma taxa de enchimento de 5 cm/min até o nível da água chegar a 65 cm.

Neste modelo, devido ao processo de umedecimento proporcionado pela elevação do nível d'água, foram observados processos de falha e surgência de água no pé do talude. Também foram observados aumentos gradativos do teor de umidade volumétrica de acordo com o processo de saturação pela infiltração de água.

Em resumo, as falhas de taludes induzidas pela chuva foram essencialmente iniciadas sob condições drenadas pela perda de suporte lateral, resultante de falhas anteriores induzidas por infiltração localizada, sendo o deslizamento não circular translacional o modo de falha

dominante, conforme Figura 2.14. Os tempos de verificação da ruptura do talude foram de 1 a 15 min, 6 min, 36 min e de até 450 min dependendo das condições impostas.

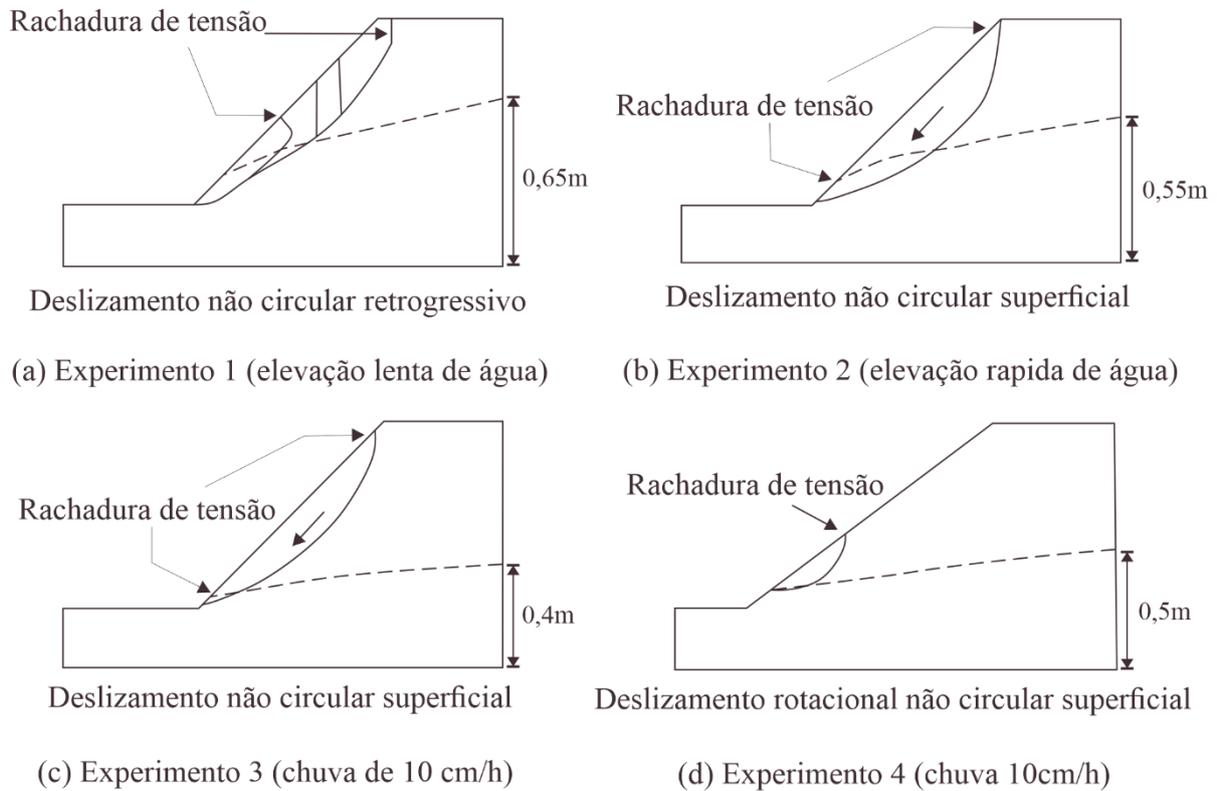


Figura 2.14. Tipos de processos de falha visualizados no programa experimental. Fonte: Modificado de Tohari *et al.* (2007)

Modelo Físico de Schnellmann *et al.* (2010)

O trabalho de Schnellmann *et al.* (2010) foi direcionado ao estudo do efeito da elevação do nível d'água em um talude não saturado. Este trabalho, como muitos outros, tem investigado a influência das mudanças climáticas para a indução de deslizamentos e quais os aspectos geradores de instabilidades nos maciços de solo.

Neste contexto, para os estudos destes aspectos, foi desenvolvido um modelo reduzido em ambiente de laboratório para investigar experimentalmente o processo de elevação e rebaixamento do lençol freático e, além disto, foram conduzidas análises pelo método de elementos finitos para a simulação do processo de infiltração sob condições estacionárias e transientes.

Para a construção do talude foi utilizado um solo arenoso de granulometria grossa, selecionada de uma região de cascalho localizada próximo a *Eschenbach SG*, na Suíça. Na Figura 2.15-a está representado a curva granulométrica, bem como na Figura 2.15-b a *SWRC* do solo.

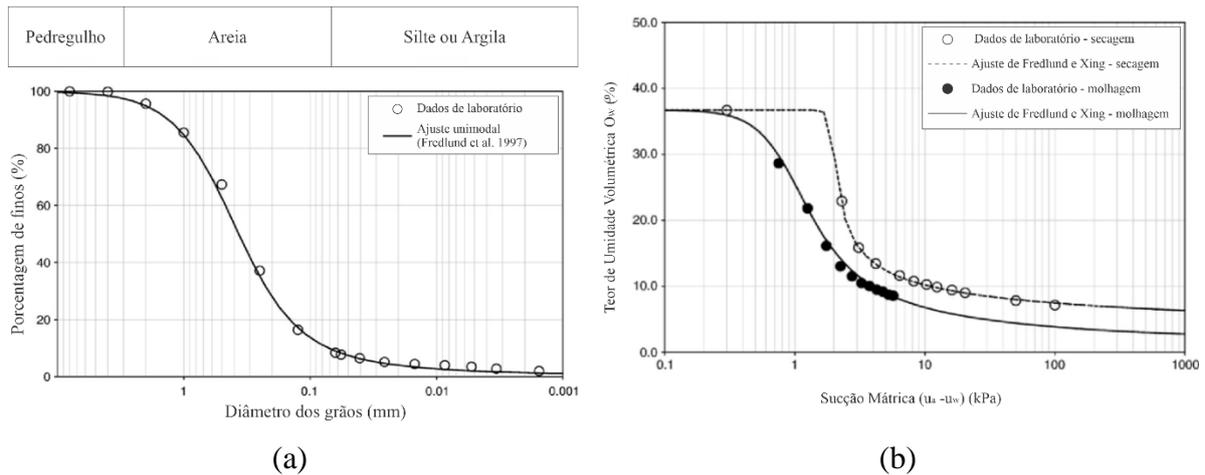


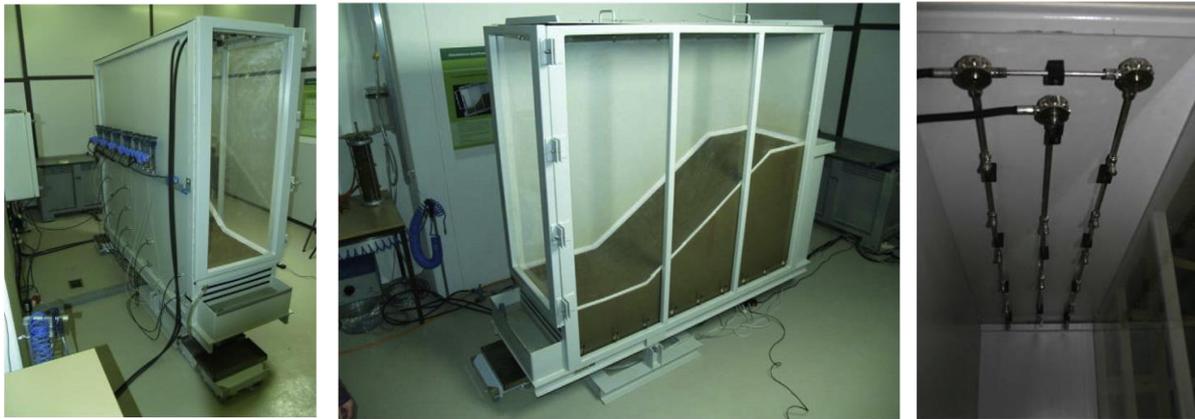
Figura 2.15- Caracterização física e hidráulica do solo do modelo reduzido. (a) Curva granulométrica; e (b) SWRC da areia. Fonte: Modificado de Schnellmann *et al.* (2010).

Quanto à construção da caixa experimental, esta foi projetada com dimensões de 2,40 m de comprimento, 1,80 m de altura e 0,60 m de espessura. Na região frontal da caixa e em uma das paredes laterais, foram colocadas placas de acrílico para possibilitar a visualização do talude durante o ensaio, enquanto que as outras paredes foram fabricadas de placas de aço. Enfatiza-se também neste trabalho que não foi informado a escala de projeto e nem foi citado a respeito da concordância do projeto com as leis de semelhança. As citações a respeito do modelo reduzido foram: modelo de talude em pequena escala (*small-scale model slope*). O talude de solo, o mesmo foi montado com as dimensões de 2,0 m comprimento, 1,0 m de altura e 0,60 m de espessura. As imagens do aparato experimental podem ser observadas na Figura 2.16.

Para a simulação da percolação de montante para a jusante do talude de solo, a caixa experimental possui um reservatório d'água de 0,20 m de largura nas laterais de cada lado de montante e jusante. Estas caixas são separadas do solo por uma placa de aço com ranhuras e uma tela filtrante para permitir o fluxo de água sem o carreamento do solo.

A reprodução da chuva foi possível por um simulador com diversos bicos de saída que permitiu uma simulação de uma intensidade de chuva de até 60 mm/h na forma de névoa de água, para que fosse criada uma distribuição uniforme da chuva e ao mesmo tempo evitar pontos de erosão na superfície do talude.

Os dispositivos de medição e o sistema de aquisição de dados ficou a cargo 12 (doze) tensiômetros, sistema de 11 (onze) TDR's (*Time Domain Reflectometry* - Reflectômetro no Domínio do Tempo) e dispositivos de medição de vazão de água.



(a)

(b)

(c)

Figura 2.16. Caixa experimental utilizada em Schnellmann *et al.* (2010): (a) vista do acoplamento dos sensores; (b) vista em perspectiva do equipamento; e (c) vista dos bicos de produção da chuva artificial.

O programa experimental foi conduzido primeiramente com a configuração das condições iniciais para que com a elevação e em seguida a manutenção de um nível d'água à montante do equipamento, fosse possível a formação de uma superfície freática. Para isto, as alturas da coluna de água foram elevadas de 10 cm para 25, 45 e 65 cm. Com isto, foi possível verificar as mudanças de valores da poropressão e teor de umidade. Neste artigo em específico, apesar de ser apresentado o aparato de simulação de chuva, esta análise não foi objeto de estudo.

As principais conclusões dos autores foram a respeito das medições das poropressões que foram maiores que -4 kPa, que pode ser justificada pela permeabilidade acentuada desta areia, sendo que a permeabilidade cai significativamente quando as poropressões são inferiores que -1 kPa. Portanto, o comportamento das poropressões é explicado em um talude não saturado, especialmente pelo processo de equalização das pressões negativas da água nos poros, devido à elevação do lençol freático.

Modelo Físico de Egeli & Firat Pulat (2011)

Em seu trabalho, Egeli & Firat Pulat (2011) foram mais específicos ao abordarem os mecanismos de estabilidade para taludes em condição não saturada, durante eventos de precipitação de alta intensidade e curta duração. Os autores investigaram também, como a infiltração de água de chuva é capaz de alterar o atrito intergranular e as tensões efetivas.

Para esta avaliação, o trabalho dos autores consistiu em desenvolver um sistema para simulação de um modelo físico de talude em laboratório, que foi denominado de: Sistema de Modelagem das Interações Solo-Água (*Soil-Water Interaction Modelling System- SWIMS*). O solo utilizado na construção do talude foi uma argila siltosa, sendo que para a determinação de

suas características foram realizados ensaios de granulometria, limites de Atterberg e compactação. Na Figura 2.17 está ilustrada a curva granulométrica do material utilizado.

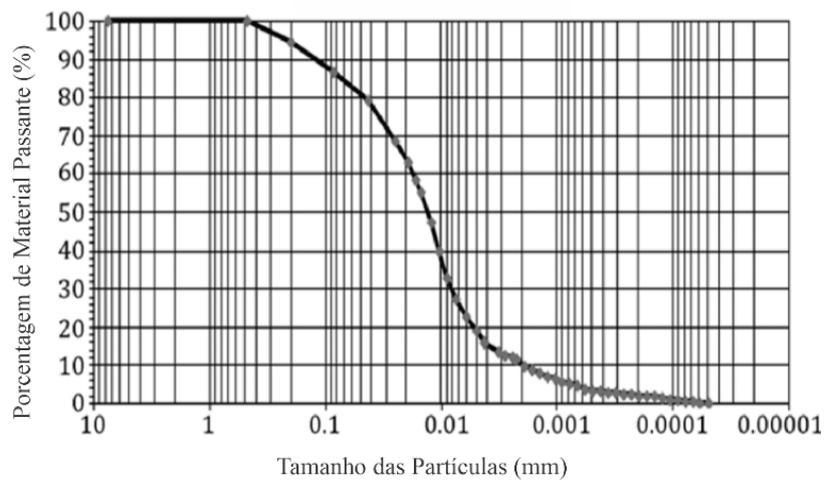


Figura 2.17. Curva granulométrica do solo utilizado. Fonte: Modificado de Egeli & Firat Pulat (2011).

Quanto ao equipamento (*SWIMS*) ilustrado na Figura 2.18-a, pode-se observar os componentes principais do sistema, formados por: um sistema de armazenamento e transmissão de água até o equipamento, uma mesa de ensaio projetada em acrílico com coletor de escoamento superficial e um sistema para permitir a inclinação da mesa.

Na Figura 2.18-b, observa-se o *SWIMS* sendo ensaiado. Para obter esta conformação, os autores descrevem que a amostra de solo foi submetida à compactação em três camadas, utilizando o soquete do ensaio de Proctor Normal de 10 ou 25 golpes.

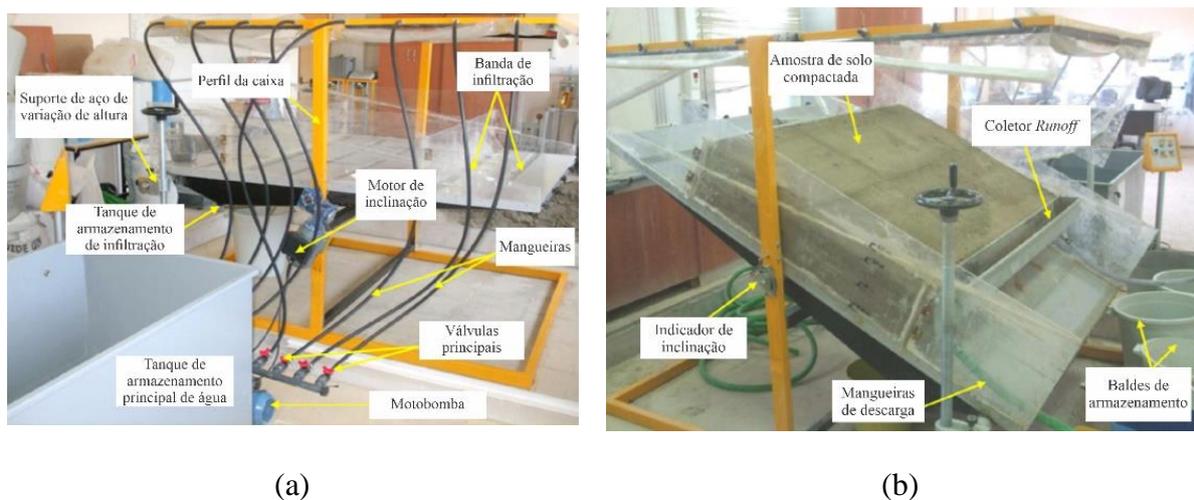


Figura 2.18. Equipamento – *SWIMS* de Egeli & Firat Pulat (2011): (a) Equipamento e seus componentes; e (b) *SWIMS* em processo de ensaio. Fonte: Modificado de Egeli & Firat Pulat (2011)

Relacionado ao programa experimental, foram realizados 12 cenários de testes, modificando parâmetros, como: ângulo de inclinação (15°, 25° e 35°), número de golpes, densidade do solo e teor de umidade inicial. Também foi utilizada uma precipitação constante para todos os cenários de 0,18 l/s/m² e a mesma duração de 1500 s. Quanto aos sensores, foram utilizados somente 05 (cinco) tensiômetros para as medições direta de sucção.

Neste trabalho, os autores também realizaram uma simulação numérica para comparar com os resultados obtidos experimentalmente. Na simulação, o solo foi modelado como um meio homogêneo, bidimensional e de deformação plana. O modelo utilizado foi o modelo de plasticidade do solo de *Mohr-Coulomb*.

É importante apontar que a questão do fator escala só foi observada para a reprodução dos efeitos observados no campo experimental para a simulação numérica. Portanto, a relação do fator de escala entre o modelo de laboratório e o modelo de análise numérica foi assumida como: 1/10.

Como resultados experimentais, Egeli & Firat Pulat (2011) observaram que: (a) em todos os ensaios com inclinações de 35° romperam por falha translacional; (b) um acréscimo no fator de segurança (FS) com o aumento do grau de compactação, porém houve um decréscimo de FS relativo à elevação do ângulo de inclinação; (c) parâmetros como densidade do solo, porosidade, grau de saturação, teor de umidade e permeabilidade podem afetar na resistência ao cisalhamento. Os resultados da simulação numérica foram semelhantes aos experimentais e corroboraram para a comprovação dos resultados descritos nos itens a, b e c anteriormente citados.

Modelo Físico de Pajalić et al. (2021)

O trabalho produzido por Pajalić et al. (2021) foi um dos estudos de maior contribuição para o desenvolvimento desta tese, devido ao enfoque dado à importância de um sistema de monitoramento para o acompanhamento de cada detalhe, interno e externo ao maciço de solo, do processo de ruptura.

Em seu artigo, os autores enfatizaram a importância do monitoramento e da análise de dados, a partir da explanação das vantagens e desvantagens de utilização, com o intuito de aplicar as lições aprendidas em um modelo reduzido para condições reais. Desta forma, o modelo físico de talude foi projetado para proporcionar a indução de um deslizamento causado por chuvas artificiais controladas. O modelo foi então equipado com equipamento fotogramétrico e rede de sensores com capacidade de medir deslocamentos, umidade do solo,

poropressões e sucção dentro de um maciço em processo de deslizamento. A Figura 2.19-a e b ilustram o equipamento e os acessórios de monitoramento utilizados.

Relacionado às amostras de solo utilizadas para a montagem do modelo, os autores explicam que foi utilizado um material arenoso fino (0 – 1,0 mm), devido ao comportamento relativamente simples do processo de infiltração e ao desencadeamento da falha. Para a determinação das propriedades do material, foram efetuados ensaios de granulometria, de índice de vazios, cisalhamento direto e permeabilidade a carga constante.

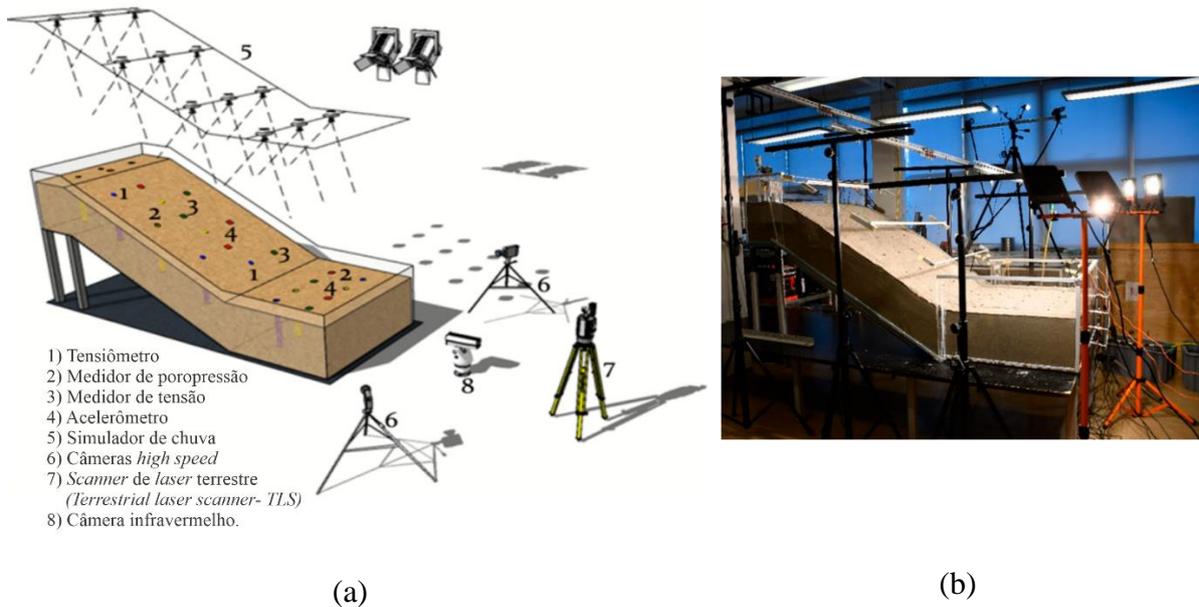


Figura 2.19. Equipamento desenvolvido por Pajalić *et al.* (2021): (a) Esquema ilustrativo e instrumentação utilizada; (b) Fotografia do modelo físico. Fonte: Modificado de Pajalić *et al.* (2021)

Quanto à caixa experimental, os autores a descrevem como uma calha que foi projetada em uma plataforma de trabalho, construída sobre uma placa de base de aço com laterais com placas de acrílico, que permitiram a observação da frente de molhamento e do desenvolvimento de trincas durante os ensaios. As dimensões do equipamento foram construídas com 230 cm de comprimento, 100 cm de largura e 50 cm de altura. Em relação às dimensões do talude, adotou-se como profundidade máxima do material do solo no talude 30 cm. É interessante observar que o equipamento também permitiu uma inclinação do declive de 20° a 45°. É importante acrescentar que neste trabalho os autores não informaram a escala do projeto da caixa experimental, sendo o trabalho citado apenas como modelo físico em pequena escala (*small-scale physical model*).

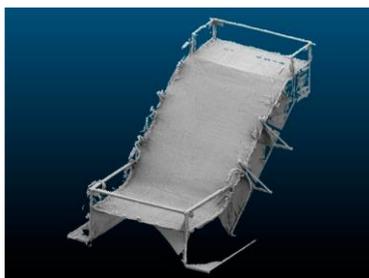
A campanha de monitoramento contou com uma robusta instrumentação em duas diferentes áreas de monitoramento: geodésico e geotécnico. A instrumentação geodésica compreendeu uma câmera de vídeo de alta velocidade para a medição do deslocamento e um *scanner a laser* para a medição da deformação. Quanto à instrumentação geotécnica foram utilizados acelerômetros, sensores de umidade, transdutores poropressão e tensiômetros.

Sobre a montagem do talude no equipamento, para alcançar a homogeneidade e condições uniformes do material, o modelo foi construído em três segmentos, do pé até o topo da encosta. Desta forma, inicialmente, todo o material foi preparado para a obtenção de um teor de umidade de 2%. A compactação do material preparado, foi realizada por camadas para uma densidade relativa de 50%.

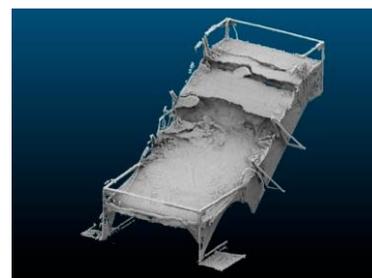
Um simulador de chuva foi projetado para atender às taxas de precipitação desejadas durante o ensaio. Desta forma, o sistema foi projetado em três linhas paralelas sobre o modelo e, em cada uma delas, foram acoplados 04 (quatro) bicos de pulverização de água. Esta solução foi capaz de cobrir intensidade inferiores a 30 L/h/m² até superiores a 140 L/h/m².

O programa experimental compreendeu a execução de 03 (três) ensaios com a aplicação de uma chuva artificial em que foram variados parâmetros, como: ângulo de inclinação do talude e a intensidade de chuva, e foram verificados três momentos diferentes de início de ruptura. Em resumo, pode-se observar na Figura 2.20-a-d, a conformação resultante do talude, devido à aplicação da precipitação artificial.

De acordo com os autores, o processo de falha foi conduzido devido ao aumento do nível d'água que foi responsável pela redução da sucção e das tensões efetivas na região do pé do talude. Ainda conforme as observações, após a formação das primeiras trincas na base, o desenvolvimento do movimento de massa foi manifestado em forma de distribuição retrogressiva. A instrumentação garantiu a análise dos deslocamentos e do teor de umidade volumétrica de água, respostas que possibilitaram identificar o início da falha, anterior à percepção visual e a reconstrução do desenvolvimento da falha, conforme observou-se na Figura 2.20- b e d.



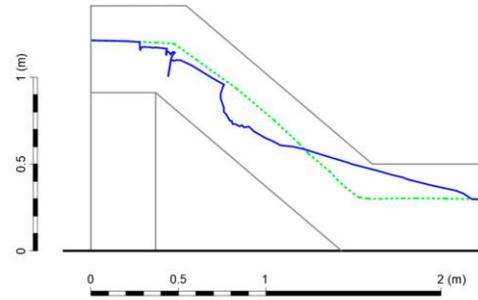
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.20. Modelo físico em pequena escala desenvolvido por Pajalić *et al.* (2021).

Fonte: Pajalić *et al.* (2021)

Tabela 2.3. Principais referências em modelagem física de taludes (1g) e as características de seus modelos

Referência	Fenômeno	Equipamento		Solo	Instrumentação	Programa Experimental	Ruptura por
		Dimensões	Escala				
Moriwaki <i>et al.</i> (2004)	Infiltração/ Percolação	2600cm x 300cm x 780 cm	Escala Real (<i>full- scale</i>)	Areia fina	- Transdutor de deslocamento da superfície - Nível piezométrico - Medidor de poropressão, nível piezométrico no leito da calha, pressão da água nos poros no solo, localizações da superfície de deslizamento e movimento de deslizamento de terra.	- Teste de precipitação com intensidade em 100 mm/h com elevação de NA	- Aumento da saturação - Elevação da poropressão - Redução da resistência ao cisalhamento - Formação de uma zona de cisalhamento
Orense <i>et al.</i> (2004)	Infiltração/ Percolação	220cm x 80cm x 100cm	Pequena Escala (<i>small- scale</i>)	Silte arenoso	- ADR - Medidor de poropressão - Transdutor de deslocamento	- Teste de percolação com coluna de água de 80 cm. - Teste de precipitação com variação da intensidade em: 70 – 96 mm/h, 154 mm/h, 80 – 262 mm/h e 42 – 72 mm/h	- Aumento da saturação - Elevação da poropressão - Redução das tensões efetivas - Redução da resistência ao cisalhamento
Tohari <i>et al.</i> (2007)	Infiltração/ Percolação	200cm x 100cm x 150 cm	Pequena Escala (<i>small- scale</i>)	Areia	- Sensor de umidade	- Teste de percolação com coluna de água - Teste de precipitação com intensidade em 100 mm/h	- Aumento da saturação - Mudanças nas tensões concentradas
Damiano & Olivares (2009)	Infiltração	170cm x - x 150 cm	Pequena Escala (<i>small- scale</i>)	Solo piroclástico granular	- TDR - Sensores a <i>laser</i> - Câmeras de alta definição - Tensiômetros - Medidor de poropressão	- Caracterização mecânica e hidráulica do solo; - Teste de infiltração; - Calibração de um modelo numérico por retroanálise da infiltração; - Retroanálise de medições de sucção <i>in situ</i> por meio de simulações numéricas realizadas com condições de contorno e iniciais derivadas de monitoramento <i>in situ</i> .	-Redução da sucção - Mudanças nas propriedades mecânicas e hidráulica
Jia <i>et al.</i> (2009)	Percolação	1500cm x 500cm x 600cm	Larga Escala (<i>large- scale</i>)	Silte arenoso	-Tensiômetros Células de pressão de terra vibratória - Piezômetros de fio vibratório - Medidores de inclinação - LVDTs.	- Teste de percolação com enchimento e rebaixamento de NA	-Redução da sucção mátrica - Elevação das poropressões - Aumento das tensões totais - Forças de percolação

Lee <i>et al.</i> (2010)	Infiltração	200cm x 10cm x 110cm	Pequena Escala (<i>small-scale</i>)	- Areia-cascalho - Cascalho siltoso - Silte arenoso - Silte (caulim)	- Medidores de sucção: Tensiômetro e Bloco de gesso	Teste de precipitação com variação da intensidade em: 66 mm/h e 12 mm/h	Não ocorreu
Schnellmann <i>et al.</i> (2010)	Percolação	240cm x 180cm x 60cm	Pequena Escala (<i>small-scale</i>)	Areia grossa	- TDR -Tensiômetro -Medidor de vazão	- Teste de percolação com coluna de água de 10, 25, 45 e 65cm	Não ocorreu
Egeli & Firat Pulat (2011)	Infiltração	150cm x 100cm x 25cm	Pequena Escala (<i>small-scale</i>)	Argila siltosa	- Tensiômetros	- 12 cenários de testes experimentais, variando ângulo de inclinação (15°, 25° e 35°), número de golpes, densidade do solo e teor de umidade inicial e chuva constante - Simulação numérica (Método dos Elementos Finitos) – Modelo de Plasticidade de Mohr-Coulomb	- Aumento do ângulo de inclinação do talude - Diminuição do grau de compactação
Hakro & Harahap (2015)	Infiltração	220cm x 100cm x 220cm	Pequena Escala (<i>small-scale</i>)	Areia	-TDR -Piezômetro	- Teste de infiltração	- Aparecimento de erosões e fissuras - Elevação da poropressão
Montrasio <i>et al.</i> (2015)	Infiltração	136cm x 50cm x 35cm	Pequena Escala (<i>small-scale</i>)	Alta porcentagem de cascalho e areia Baixa porcentagem de silte e argila	- Tensiômetro - Medidor de poropressão	- 29 Testes de precipitação com intensidade em variando a porosidade e o teor de umidade.	- Aumento da saturação - Alta porosidade - Mudanças nas propriedades mecânicas e hidráulica
Cogan & Gratchev (2019)	Infiltração	150cm x 63cm x 83cm	Pequena Escala (<i>small-scale</i>)	Areia	- Medidor de poropressão - Sensor de umidade	- Teste de precipitação com variação da intensidade em: 40, 70 e 100 mm/h, variação do ângulo de inclinação do talude de 45 a 55° e teor de umidade inicial de 5 a 12%	- Elevação da poropressão
Pajalić <i>et al.</i> (2021)	Infiltração/ Percolação	230cm x 100cm x 50cm	Pequena Escala (<i>small-scale</i>)	Areia fina	- Câmera de vídeo de alta velocidade - <i>Scanner a laser</i> - Acelerômetros - Sensor de Umidade - Transdutor de poropressão -Tensiômetro	- Teste 01: ângulo de inclinação de 30° e intensidade de chuva de 58 e 122 mm/h - Teste 02: ângulo de inclinação de 35° e intensidade de chuva de 73 mm/h - Teste 03: ângulo de inclinação de 45° e intensidade de chuva de 73 e 63 mm/h	- Redução das tensões efetivas; - Perda de resistência ao cisalhamento no pé do talude - Redução da sucção

Nota: Na coluna de “Dimensões” a ordem de apresentação é comprimento x largura x altura

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGIA

Neste tópico serão apresentadas as etapas metodológicas que foram implementadas para que os objetivos da tese fossem alcançados. Em síntese, a pesquisa seguiu 4 etapas de execução relacionadas: (1) ao *Equipamento Experimental*; (2) ao Material Geotécnico empregado; (3) à Instrumentação e; (4) à delimitação do Programa experimental.

Na Figura 3.1 pode ser visualizado o esquema metodológico geral que guiou as atividades de investigação, de pesquisa e de estudo para o alcance do objetivo proposto nesta tese.

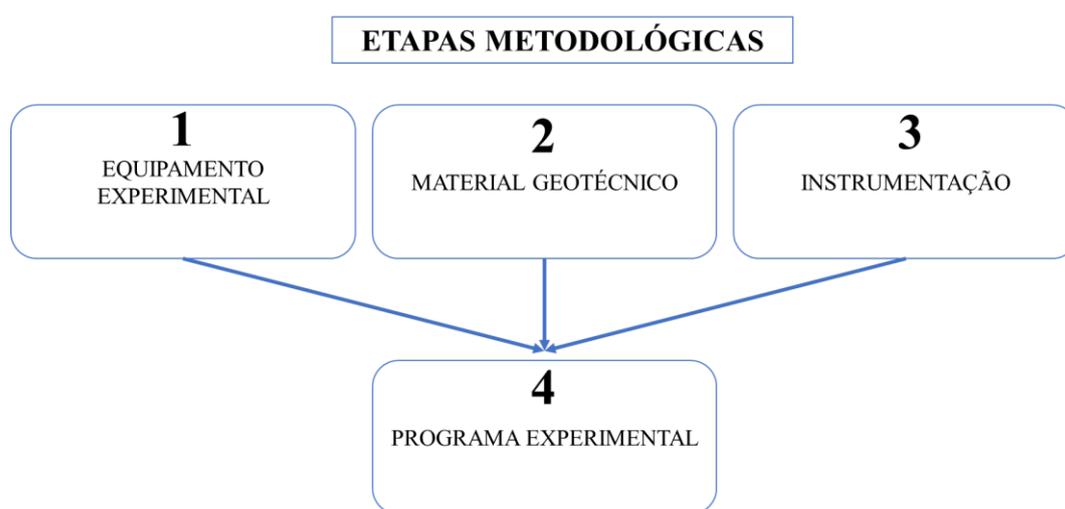


Figura 3.1: Esquema geral do desenvolvimento metodológico da pesquisa.

3.1 Equipamento experimental

Para a reprodução e simulação de deslizamentos superficiais por modelagem física a 1g em ambiente de laboratório, foi necessária a criação de um equipamento de simulação em pequena escala, em que fosse possível a execução de todo o programa experimental proposto.

Assim, foi desenvolvido um *Equipamento Experimental* de simulação para investigar as inter-relações entre a infiltração de água de chuva e a estabilidade em solos não saturados. O equipamento foi inspirado, particularmente, no trabalho de Jia *et al.* (2009) e Pajalić *et al.* (2021). Ambos os trabalhos ofereceram embasamento teórico singular a respeito da escala adequada de trabalho, bem como da geometria a ser adotada para o talude, dos tipos usuais de instrumentação geotécnica e das possíveis análises do fenômeno simulado.

Enfatiza-se que para a concepção deste projeto, visto que não foi objetivo desta tese reproduzir o fenômeno de movimento de massa de um talude real existente, não foi definido

um *fator escala* para a reprodução de características de um protótipo, mas sim do *Equipamento Experimental* criado, servir de um fornecedor confiável de fonte de dados experimentais para futuras modelagens matemáticas e retroanálises, conforme esclarece Al Heib *et al.* (2019) em seu trabalho.

Dessa forma, foi concebido um *Equipamento Experimental* para a montagem de um modelo físico de talude a 1g em pequena escala. Desta forma, o equipamento foi projetado em estrutura metálica reforçada, com a pretensão de comportar cerca de 1.000 kg de material em seu interior. O projeto e o equipamento montado podem ser visualizados na Figura 3.2 e Figura 3.3-(a-b), respectivamente.

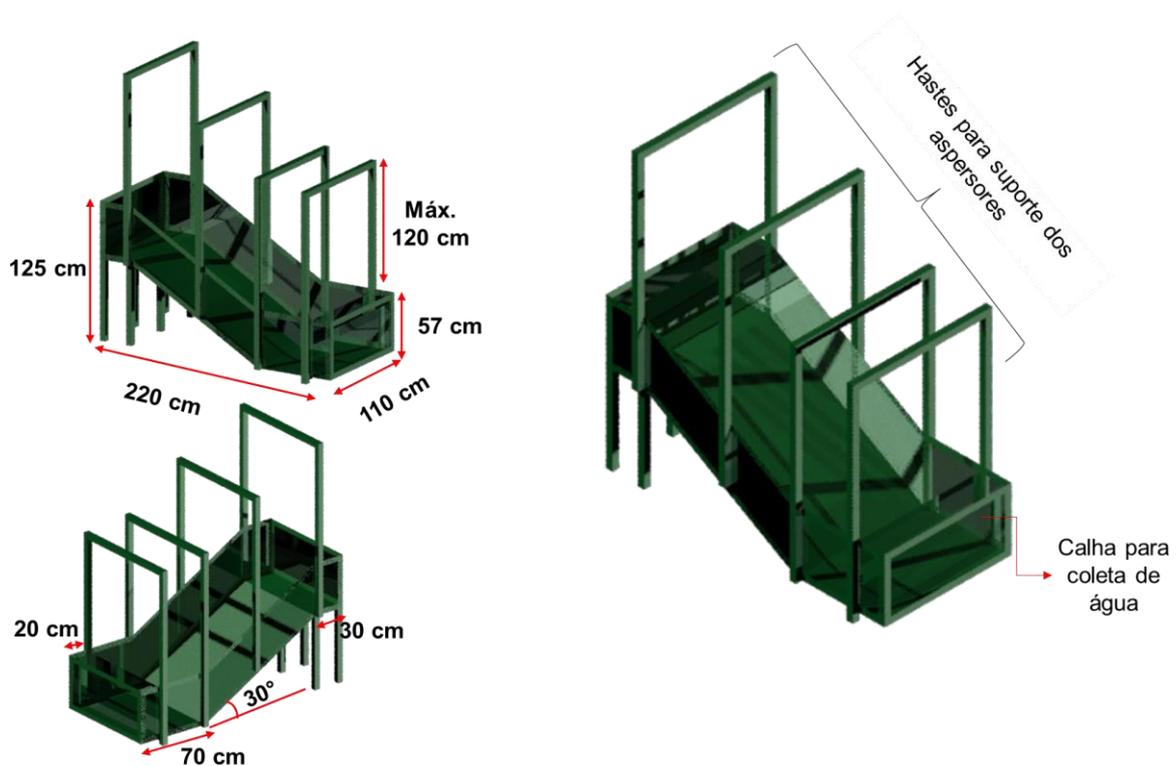


Figura 3.2. Esquema ilustrativo do *Equipamento Experimental* desenvolvido.

O *Equipamento Experimental* consistiu em uma calha metálica inclinada de base impermeável, apoiada sobre o chão, de dimensões de: 220 cm (comprimento) x 110 cm (largura) x 125 cm (altura maior) e 57 cm (altura menor), como observa-se na Figura 3.2. A região do topo do talude teve a dimensão de 30 cm, enquanto que a região inferior teve 70 cm, sendo este comprimento dividido em 50 cm para a base do talude e os 20 cm restantes serviu como calha de coleta da água escoada. A separação da base do talude para a região coletora foi feita pela colocação de uma placa de acrílico de dimensões de 100 cm x 55 cm de altura. A inclinação permitida pela caixa foi de 30°, não sendo possíveis variações, devido às limitações financeiras do projeto construtivo.



Figura 3.3. Fotografia do Equipamento de Simulação proposto. (a) Vista lateral; (b) Vista frontal.

As laterais da calha foram vedadas com placas de acrílico de 6 mm de espessura para possibilitar a observação do comportamento do talude durante a simulação da chuva artificial. Além disto, nas laterais e na parte superior do equipamento foram previstas 04 hastes reguláveis, em forma de U invertido com elevação máxima permitida de 120 cm (em relação à estrutura lateral) distribuídas uniformemente sobre o modelo, sendo utilizadas para o acoplamento dos canos de distribuição de água para os aspersores que irão simular uma chuva artificial. Além disto, na região do declive foram coladas fitas antiderrapantes para o aumento do atrito entre a superfície metálica e solo.

O equipamento foi posicionado na sala de modelos físicos do Laboratório GeoFluxo, localizado no subsolo do prédio SG-12 – Laboratório de Engenharia Civil e Ambiental, no *campus* Darcy Ribeiro da UnB, onde foram realizados todo o programa experimental.

3.2 Sistema de chuva artificial

Para ensaios em modelos físicos reduzidos de taludes que simulem quaisquer fenômenos que sejam induzidos por eventos de precipitação, faz-se necessária a montagem de um simulador de chuvas, pela necessidade do controle total das intensidades aplicadas. Para esta tese, foi montado um sistema de aspersão sobre o *Equipamento Experimental*.

Este sistema foi composto por cinco componentes, que foram: (1) aspersores de água; (2) canos PVC de distribuição e os conjuntos de mangueiras; (3) válvula reguladora de pressão;

(4) minibombas de alta pressão e; (5) tanques de armazenamento de água. Na Figura 3.4 está representado um esquema ilustrativo com o apontamento de todos os componentes.

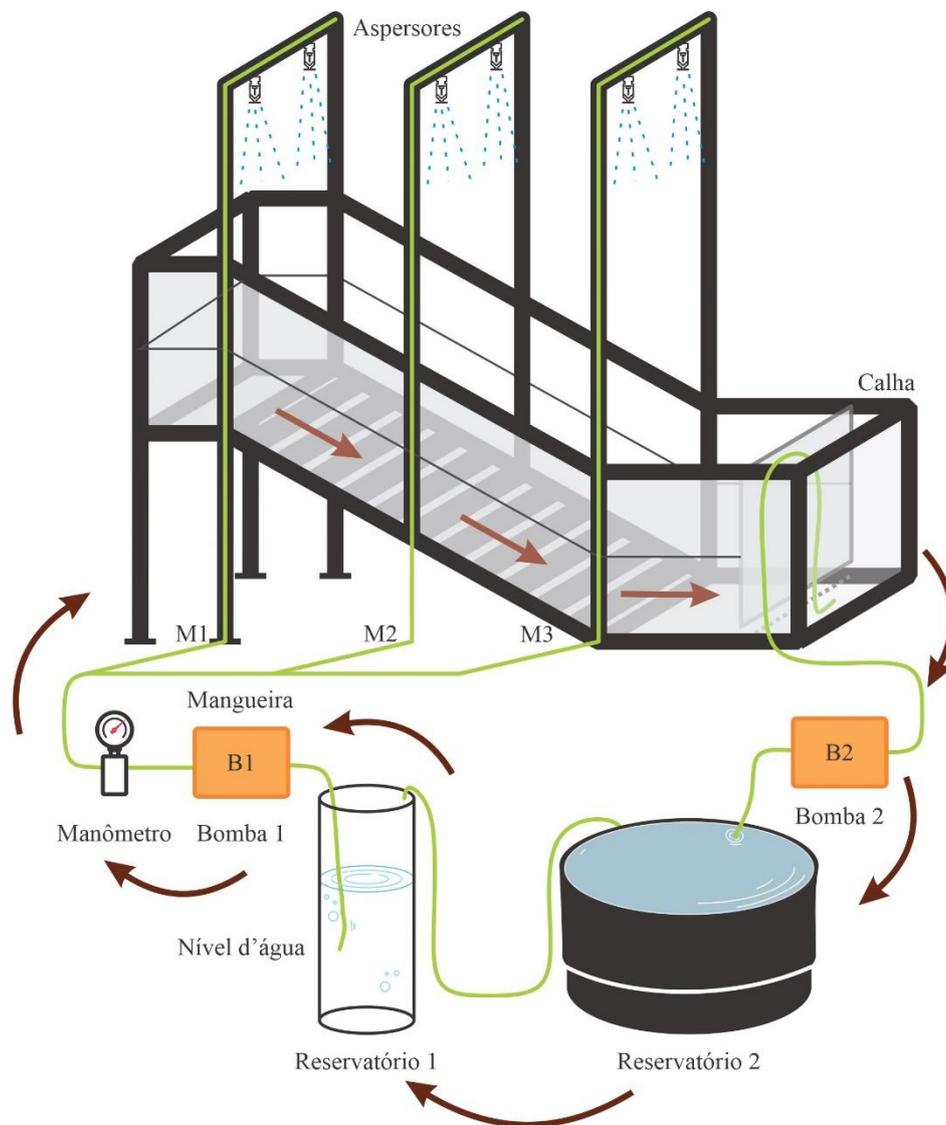


Figura 3.4. Vista do *setup* do sistema de chuva artificial sobre o modelo físico. Setas demonstrando a direção do fluxo de água.

1) Aspersores de água

A respeito dos aspersores de água, foram utilizados 06 (seis) aspersores reguláveis do tipo *Rain Bird X360 ADJ*, ilustrados na Figura 3.5- (a-b), com capacidade de produção de uma intensidade de chuva de 37 a 78 mm/h. Os seis aspersores foram acoplados em pares, em três das quatro hastes reguláveis e distanciados de 30 cm entre si.



(a)



(b)

Figura 3.5. Aspersores utilizados no sistema de chuva artificial: (a) Imagem dos aspersores do tipo *Rain Bird X360 ADJ* e; (b) aspersores acoplados em pares no cano PVC de distribuição de água.

Os aspersores forneceram um jato de água em 360° e foi tomado o cuidado de calibrá-los para que a pressão de água de saída não perturbasse a superfície do talude e o fizesse romper por erosão superficial. Além disso, o posicionamento mais central dos aspersores foi proposital para que a área de influência líquida da chuva atingisse com maior efetividade as linhas de instrumentação geotécnica.

2) Canos de distribuição de água e os conjuntos de mangueiras

Para a chegada de água nos aspersores foram utilizados canos de PVC de 25 mm e cerca de 10 m de mangueira de nível. Os canos de PVC foram fixados nas hastes do Equipamento Experimental por meio de abraçadeiras de *nylon*, conforme Figura 3.6-a. Na extremidade direita de cada cano das três hastes, foram acoplados joelhos de 90° com bicos metálicos rosqueados nas conexões para o acoplamento das mangueiras (Figura 3.6-b). Assim, as mangueiras que saíram das extremidades das hastes foram acopladas em um distribuidor vertical de PVC com uma entrada vinda do tanque de armazenamento e três saídas para cada cano de distribuição, de acordo com Figura 3.6-c.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.6. Imagens dos canos e mangueiras de distribuição de água: (a) cano de PVC de 25 mm acoplado na haste central; (b) bicos metálicos para o acoplamento das mangueiras e; (c) distribuidor vertical de PVC com uma entrada e três saídas.

3) Válvula reguladora de pressão

Conforme ilustrado na Figura 3.6-c, foi conectado na porta de entrada do distribuidor vertical uma válvula reguladora de pressão de água 3/4" polegada com manômetro da fabricante Druck. Optou-se por utilizar esta válvula para a medição da pressão de água de entrada no distribuidor e regulá-la de acordo com a necessidade de projeto.



Figura 3.7. Válvula reguladora de pressão de água 3/4" polegada com manômetro utilizada.

4) Minibombas d'água de alta pressão

Para a alimentação de água do tanque de armazenamento para o Equipamento Experimental, foi utilizada uma minibomba de alta pressão da fabricante *Rhondamaq*. Uma segunda bomba do mesmo modelo também foi utilizada para fazer a retroalimentação da calha de coleta da água escoada para o tanque de armazenamento. A reutilização da parcela de chuva

escoada foi realizada a fim de diminuir o desperdício durante os ensaios, como será apresentado no item 3.5.1, em que haverá uma apresentação detalhada da fase de testes e um esquema ilustrativo do sistema de retroalimentação desenvolvido, que também foi utilizado para o Equipamento Experimental.

Conforme a fabricante, as especificações técnicas do modelo da minibomba utilizada podem ser verificadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Principais especificações técnicas da minibomba de alta pressão.

Fabricante	Produto	Especificações Técnicas
Rhondamaq	Mini Bomba d'água de Alta Pressão	<p>Tensão: 12 V Potência: 80 W Pressão máxima de trabalho: 5,5 bar (79,75psi ou 55 mca) Pressão nominal (máx.): 0,9Mpa pressão máxima: 9 bar (130,5psi) Vazão (máx.): 5,5 L /min (330 L/h) Sucção máxima: 3 m Elevação máxima: 60 m</p>

Na Figura 3.8 está apresentada a imagem da minibomba utilizada.



Figura 3.8. Minibomba d'água de alta pressão da fabricante *Rhondamaq* para a promoção da precipitação artificial.

5) Tanque de armazenamento de água

Para o armazenamento de água a ser utilizada na simulação da chuva artificial, foi utilizado um tanque com capacidade de até 200 L, conforme ilustrado na Figura 3.9.



Figura 3.9. Tanque de armazenamento de água.

Vale ressaltar que este tanque foi preenchido antes da execução de cada ensaio, pois mesmo com as tentativas de economia de água com a retroalimentação, houve a necessidade de preenchimento do mesmo para evitar a falta d'água durante o experimento.

3.3 Material Geotécnico

Como material geotécnico para a construção do modelo físico de talude em pequena escala, foi escolhido um material arenoso fino comercializado por estabelecimentos de materiais de construção. A sua utilização foi efetuada por motivos de o material possuir uma relativa facilidade de observação do processo de fluxo, devido à sua condutividade hidráulica ser maior do que a de materiais mais finos, como silte e argila.

Segundo Egeli & Firat Pulat (2011), a modelagem física com a utilização de solos não coesivos possui a vantagem de eliminar os efeitos de sucção osmótica, que é associada mais fortemente com a presença de argila. Isto também foi importante no processo de escolha do material.

Outro fator ponderador esteve relacionado à sua capacidade de manuseio, trabalhabilidade e reutilização, além de ser um material de fácil obtenção para garantir a quantidade suficiente para o ensaio. Teve-se o cuidado também, de adquirir o material em apenas uma remessa de compra, para garantir a maior homogeneidade quanto possível do material.

Além disso, a escolha da areia para a construção do modelo físico se deu para efeitos de comparação com outros trabalhos já produzidos, o que possibilitou possíveis previsões de seu desempenho.

Desta forma, foram adquiridos 50 sacos de 20 kg de areia fina lavada. Vale ressaltar que todo o material passou pelo processo de secagem ao ar no Laboratório de Hidráulica e Estruturas da UnB, para a retirada da umidade remanescente contida quando ensacado. Todo o processo levou cerca de dois meses para a completa secagem e durante este período foram sendo efetuados os ensaios de caracterização da areia.

Assim, o material geotécnico utilizado nos ensaios consiste em uma areia quartzosa, muito uniforme, portanto, mal graduada, de granulometria fina. De acordo com a classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) (ASTM D2487/11), a areia é classificada como SP (areia mal graduada).

A curva granulométrica da areia foi encontrada de acordo com recomendações da NBR 7181/2018 (ABNT, 2018) e pode ser verificada na Figura 3.10. Conforme observa-se na curva, também há a existência de grãos menores que 0,075 mm, passados na peneira de nº 200, que somados correspondem a cerca de 15% do material, esta porcentagem se deve à quantidade de impurezas encontradas no mesmo, mas que tiveram que ser consideradas devido à inviabilidade de peneirar 1 ton. de solo. Quanto às características gerais da areia, tem-se que o tamanho médio dos grãos (D_{50}) é de 0,16 mm, o coeficiente de uniformidade (C_u) é igual a 2,22 e o coeficiente de curvatura (C_c) é de 0,56.

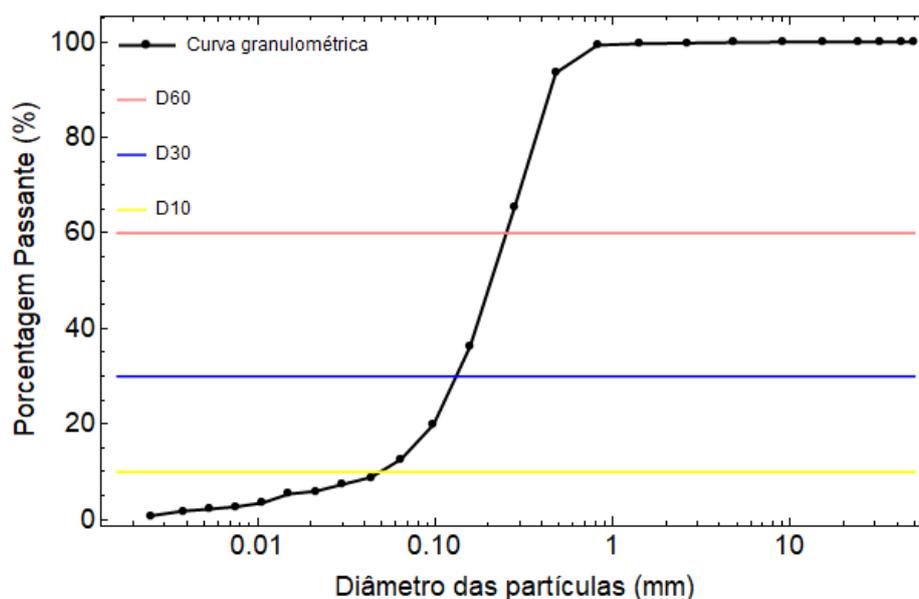


Figura 3.10. Distribuição granulométrica da areia fina utilizada para a construção do modelo físico em pequena escala.

Também foram efetuados ensaios para a determinação da massa específica dos grãos (ρ_s) (NBR 6458/2017 (ABNT, 2017)) em que foi determinado um valor de 2,62 g/cm³ e a densidade real dos grãos (G_s) foi de 2,64.

Para a determinação dos índices de vazio mínimo (e_{\min}) e máximo (e_{\max}), foram utilizadas as normas NBR 16843/2020 (ABNT, 2020) e NBR 16840/2021 (ABNT, 2021), respectivamente, para a sua determinação. Os valores encontrados de e_{\min} foi de 0,73 e de e_{\max} foi de 0,97. Valores estes que foram utilizados para a determinação da densidade relativa (D_r) de construção do modelo reduzido de talude na etapa de trabalho do programa experimental.

3.4 Instrumentação

A instrumentação geotécnica foi fundamental para o monitoramento do modelo físico de talude, pois os equipamentos utilizados traduziram o comportamento interno quantitativo do solo durante o processo de infiltração e ruptura do talude. Neste sentido, as grandezas medidas no processo de acompanhamento dos fenômenos, consistiram em: teor de umidade, sucção e condutividade hidráulica não saturada.

Assim, para as medições do modelo foram utilizados: 06 sensores de umidade, 06 tensiômetros, 01 mini infiltrômetro de disco e 02 *data loggers* de aquisição de dados, sendo que todos os equipamentos utilizados são da mesma fabricante, METER Group LatAm Ltda (METER Group AG, Munich, Germany), por questões de economicidade financeira e melhor compatibilidade entre os equipamentos.

1) Sensor de Umidade

Para a determinação do teor de umidade volumétrica, foi utilizado o sensor comercialmente conhecido como TEROs 10 *Soil Moisture sensor*. Foi eleita a utilização deste sensor por ser um equipamento de baixo custo e de fácil utilização, por não haver a necessidade de uma calibração especial, pois o mesmo já possui uma calibração personalizada de fábrica para a leitura de solos minerais na faixa de 0,00 a 0,64 m³/m³.

Em relação às características gerais do equipamento, tem-se que estes sensores possuem agulhas de aço inoxidável que devem ser introduzidos no meio poroso para a determinação do teor de umidade volumétrica, como ilustrado na Figura 3.11-(b). Ademais, posicionado a uma distância de 7,6 cm do corpo do sensor, existe um núcleo de ferrite (Figura 3.11-(a)) que possui a função de isolamento de qualquer possível interferência no sistema e, ainda, mitiga qualquer potencial ruído do meio na aquisição de dados.

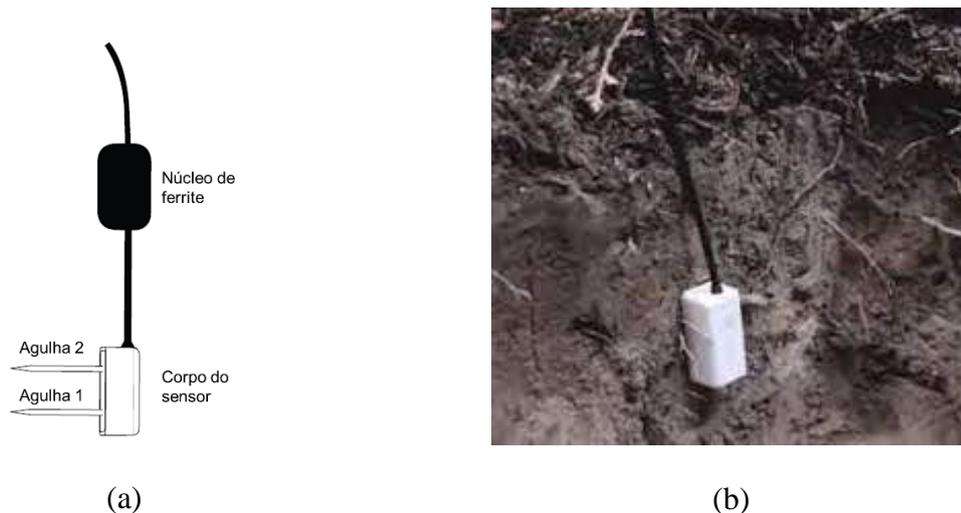


Figura 3.11. Ilustração do sensor TEROS 10, utilizado para a medição do teor de umidade volumétrica: (a) Ilustração do equipamento; (b) Sensor instalado em campo. Fonte: (Adaptado de Manual TEROS 10. Disponível em:

http://publications.metergroup.com/Manuals/20788_TEROS10_Manual_Web.pdf)

Mais especificamente relacionado à medição do aparelho, o TEROS 10 utiliza um campo eletromagnético para medir a atividade dielétrica aparente (ϵ_a) do meio. Estes sensores fornecem uma onda com oscilações de 70 MHz para as agulhas do sensor, que carregam conforme a dielétrica do material. O tempo de carga é proporcional à dielétrica do substrato e ao seu teor de umidade. Com isto, o microprocessador TEROS 10 é capaz de medir o tempo de carga e gera um valor bruto (*RAW*) com base no substrato (ϵ_a). Este valor *RAW* é então convertido em θ , por uma equação de calibração específica para o substrato onde o sensor está inserido (Manual TEROS 10). A equação de calibração para solos minerais, conforme o Manual do TEROS 10 é:

$$\theta(m^3 / m^3) = 1,895 \times 10^{-10} \times RAW^3 - 1,222 \times 10^{-6} \times RAW^2 + 2,855 \times 10^{-3} \times RAW - 2,154 \quad (3.1)$$

onde *RAW* é o valor bruto de saída do data logger.

A vantagem desses sensores possuírem uma alta frequência de medição, consiste em que o sensor não é sensível às variações na textura do solo e na condutividade eletromagnética, portanto, suas equações genéricas de calibração possuem uma acurácia razoável de 0,03 m³/m³ para a maioria dos solos minerais de até 8 dS/m.

A respeito da área de influência do sensor, a sensibilidade de medição do TEROS 10 está contida em um volume de 430 ml, conforme a Figura 3.12.

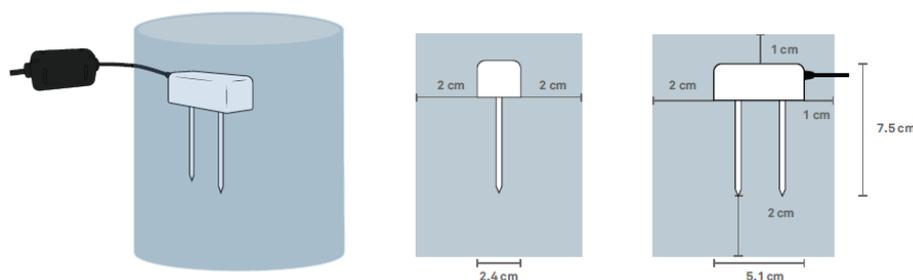


Figura 3.12. Volume de influência do TEROS 10. Fonte: (Manual TEROS 10. Disponível em: http://publications.metergroup.com/Manuals/20788_TEROS10_Manual_Web.pdf)

2) Tensiômetro

Relativo à determinação da sucção mátrica, foram utilizados tensiômetros do modelo MPS-6, com a nova versão conhecida como TEROS 21. Embora estes sensores não sejam muito difundidos no meio acadêmico, devido à falta de capacidade de medição de poropressão positiva, neste trabalho isto não foi um impedimento para a sua utilização por se tratar de uma investigação do processo de infiltração, estando o solo, portanto, em condição não saturada.

O TEROS 21 é um sensor que permite a aferição da sucção mátrica e foi projetado para medir a permissividade dielétrica de uma matriz sólida para determinar o teor de umidade desta matriz. Desta forma, as técnicas de medição da sucção presente no solo determinam a energia potencial da água em equilíbrio com a umidade do solo de acordo com a 2ª Lei da Termodinâmica. Após a água entrar em contato com o solo, a medida de sucção das placas cerâmicas do sensor se equilibra com a sucção do solo. A relação entre teor de umidade (θ) e a sucção total (ψ), *SWRC*, é utilizada para calcular a sucção mátrica. Essa abordagem de medição, juntamente com o processo de calibração usado na produção do sensor, permite medições precisas de valores de sucção (Manual TEROS 21).

Relacionado aos componentes do sensor, o aparelho é formado por discos cerâmicos porosos, como ilustrado na Figura 3.13, para a medição da sucção mátrica e da temperatura do solo. As medições são efetuadas por dois discos cerâmicos projetados entre telas de aço inoxidável e a placa de circuito. Assim, o sensor mede a permissividade dielétrica dos discos cerâmicos porosos para determinar a sucção. Conhecendo-se a permissividade dielétrica do ar, dos discos cerâmicos e da água, que são respectivamente iguais a: 1, 5 e 80, é possível determinar a permissividade dielétrica do meio no qual os sensores estão inseridos, pois os discos cerâmicos porosos são altamente dependentes da quantidade de água presente em seus espaços porosos e, por meio do equilíbrio das sucções (discos e solo), determina-se a sucção mátrica do solo.

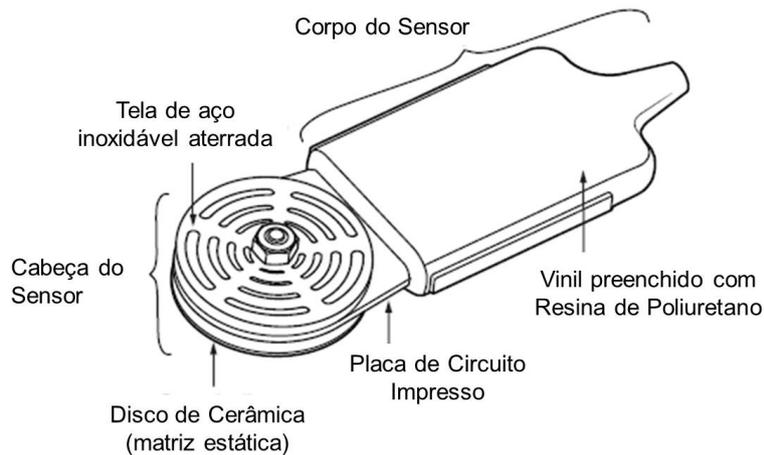


Figura 3.13. Ilustração do sensor TEROS 21 ou MPS-6, utilizado para a medição da sucção e temperatura. Fonte: Adaptado de Manual TEROS 21. Disponível em: (http://library.metergroup.com/Manuals/20854_TEROS21_Gen2_Manual_Web.pdf)

Portanto, é fundamental que os discos cerâmicos consigam trabalhar em uma ampla faixa de sucção. Assim, o tamanho do poro no disco determina o potencial de água em que um poro permite drenar (o potencial de entrada de ar ou pressão de bolha), de modo que a cerâmica ideal deve possuir poros que variem entre muito pequenos a relativamente grandes. Desta forma, os discos possuem um volume total de poros que é ponderado em direção aos poros maiores, que drenam em potenciais hídricos dentro da faixa disponível de -33 a -1.500 kPa, aproximadamente. Todavia, a faixa de medição do sensor se estende até a secagem ao ar que é de -100.000 kPa (Manual TEROS 21). A Figura 3.14 ilustra a *SWRC* dos discos cerâmicos porosos.

Conforme citam Pajalić *et al.* (2021), os trabalhos de Huang & Lo (2013) e Wu *et al.* (2017) foram alguns dos mais importantes que utilizaram como instrumentação, sensores predecessores da linha TEROS, demonstrando a confiabilidade de utilização destes sensores de baixo custo para trabalhos científicos. A confiabilidade e a precisão dos sensores são definidas pelo fabricante e podem ser verificadas com um padrão de verificação de precisão. Para um material simples como solo arenoso, foi utilizada uma curva de calibração genérica para todos os tipos de solo, o que garante precisão de $\pm 3\%$ das leituras do sensor.

A respeito das limitações de medição deste sensor para efeitos de secagem, conforme o manual do fabricante, à medida que o sensor seca além da faixa de medição disponível, o volume total de poros que drena em um determinado valor de sucção, diminui. Sendo assim, nestes baixos valores de sucção, este valor medido pode tornar-se um tanto ruidoso, pois

pequenas mudanças no teor de umidade medido pela placa cerâmica irão se traduzir em grandes mudanças nos valores de sucção.

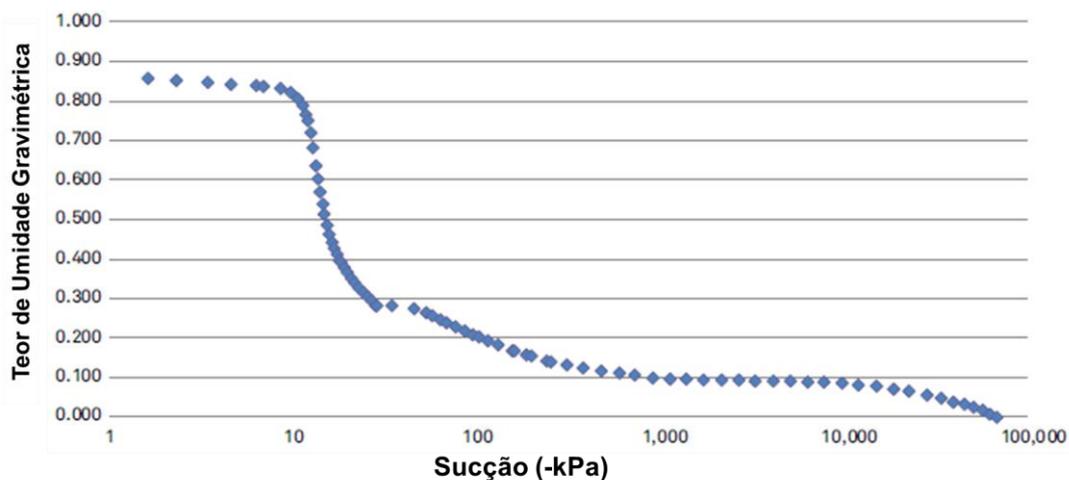


Figura 3.14. Curva de retenção da cerâmica do sensor TEROS 21 derivados de dados de porosímetro de mercúrio. Fonte: Adaptado de Manual TEROS 21. Disponível em: (http://library.metergroup.com/Manuals/20854_TEROS21_Gen2_Manual_Web.pdf)

Este fenômeno é bastante comum quando o sensor está seco ao ar. Portanto, nestas condições, espera-se que a sucção medida no sensor ao ar livre e seco possa variar na faixa de -50.000 a -100.000 kPa. Assim, enfatiza-se que o nível de ruído é muito menor quando o sensor é instalado no solo, mesmo em um meio onde encontra-se totalmente seco.

Quanto às limitações de medição para efeitos de molhagem, o potencial de entrada de ar nos maiores poros do disco cerâmico é de cerca de -9 kPa. Neste sentido, o disco precisa ter acesso ao ar para que os poros maiores comecem a drenar e a resposta do sensor mude. Assim, se o solo ao redor do sensor tiver um potencial de entrada de ar inferior (mais seco) que -9 kPa, a cerâmica não perderá água até atingir o potencial de entrada de ar do solo.

Neste cenário, o potencial de entrada de ar do solo se limita à faixa de medição úmida e o sensor pode não começar a responder até que os potenciais da água sejam mais baixos (-10 kPa). Geralmente, isso só é um problema quando se utiliza o sensor em solos mal estruturados e com alto teor de argila.

A acurácia do sensor é garantida pela calibração do aparelho. O sensor, no entanto, é calibrado em estado saturado (0 kPa), em estado seco ao ar (-100.000 kPa) e em três pontos de calibração entre 0 e -100 kPa, resultando em precisão de $\pm (10\% \text{ da leitura} + 2 \text{ kPa})$ na faixa de medição de -9 a -100 kPa.

Para valores de sucção mais secos que -100 kPa, o TEROS 21 dependerá da relação linear entre o logaritmo do teor de umidade e o logaritmo da sucção. De acordo com

informações do manual do sensor, avaliações laboratoriais mostraram boa precisão e baixa variabilidade entre sensores, até no mínimo -1.500 kPa e, em avaliações de campo, mostraram baixa variabilidade de sensor a sensor até -2.000 kPa.

3) Mini infiltrômetro de disco (*MID*)

Para a determinação da condutividade hidráulica não saturada (k_{nsat}) do solo, foi utilizado o mini infiltrômetro de disco (*MID*), ou infiltrômetro *Mini Disk*, também conhecido como permeâmetro de disco ou infiltrômetro de tensão, conforme ilustrado na Figura 3.15-a e seus componentes.

O equipamento permite determinar a taxa de infiltração sob tensão ou diferentes sucções, de acordo com o tamanho de poros existentes no solo e, por consequência disto, é possível a determinação do k_{nsat} . Desta forma, conforme o manual do equipamento, como a infiltração de água flui em taxas diferentes para diferentes tipos de solos, a taxa de sucção do infiltrômetro também deve ser ajustada conforme o meio em que será efetuado o ensaio.

Assim, para a maioria dos solos, uma taxa de sucção de 2 cm é adequada. Contudo, a taxa de sucção pode precisar ser ajustada para solos arenosos (até 6,0 cm) ou solos mais compactos (0,5 cm) (*Manual Mini Disk Infiltrometer*). Este ajuste é realizado movendo-se o tubo de controle de sucção para cima ou para baixo, de modo que o nível de água da câmara de *Mariotte* esteja nivelado com a taxa de sucção desejada, marcada na lateral do tubo de controle de sucção. Este nivelamento pode ser observado na Figura 3.15-b.

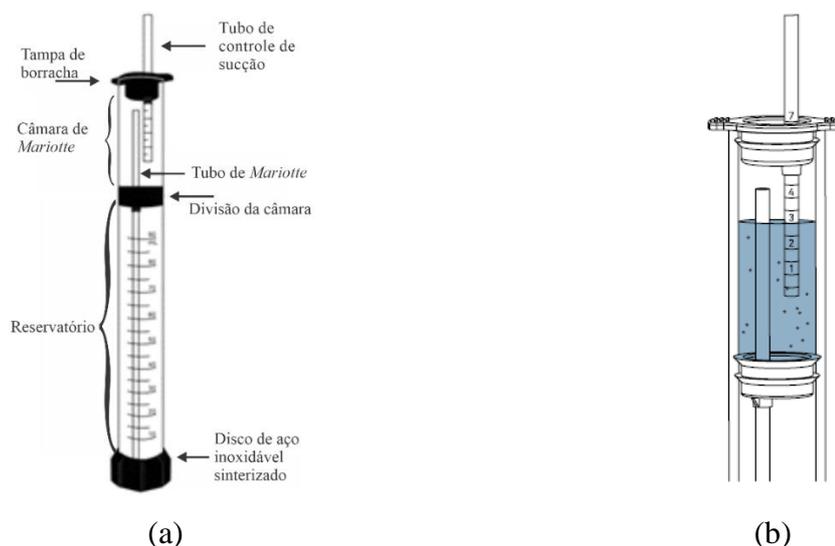


Figura 3.15. Ilustração do Mini infiltrômetro de disco (*MID*): (a) representação completa com indicação dos componentes do infiltrômetro; e (b) representação da câmara Mariotte.

Disponível em:

(https://publications.metergroup.com/Manuals/20421_Mini_Disk_Manual_Web.pdf)

A teoria fundamental que governa o princípio de determinação da condutividade hidráulica do solo, pelo *MID*, a partir de dados observacionais é o método proposto por Zhang (1997). Este método requer a determinação da medida de infiltração acumulada *versus* o tempo e o ajuste dos resultados com a função que se segue:

$$I = C_1\sqrt{t} + C_2t \quad (3.2)$$

em que C_1 está relacionado à sortividade do solo [LT^{-1}]; e C_2 está relacionado com a condutividade hidráulica do solo [LT^{-1}].

Ainda de acordo com o modelo do autor, a condutividade hidráulica do solo (k_{nsat}) é então calculada a partir de:

$$k_{nsat} = \frac{C_1}{A_G} \quad (3.3)$$

em que C_1 é a inclinação da curva da infiltração acumulada *versus* \sqrt{t} ; e A_G é o valor relacionado ao parâmetro de *van Genuchten* para um dado tipo de solo para uma determinada taxa de sucção e do raio do disco do *MID*. Os valores de A podem ser verificados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Parâmetros de *Van Genuchten* para classes de textura do solo e valores de A_G para raio do disco de 2,25 cm e valores de sucção de 0,5 a 6 cm

Textura do Solo	α	n/h_o	A_G						
			-0,5	-1	-2	-3	-4	-5	-6
Areia	0,145	2,68	2,84	2,40	1,73	1,24	0,86	0,64	0,46
Areia loam	0,124	2,28	2,99	2,79	2,43	2,12	1,84	1,61	1,40
Loam arenoso	0,075	1,89	3,88	3,89	3,91	3,39	3,95	3,98	4,00
Loam	0,036	1,56	5,46	5,72	6,27	6,87	7,53	8,25	9,05
Silte	0,016	1,37	7,92	8,18	8,71	9,29	9,90	10,55	11,24
Loam siltoso	0,020	1,41	7,10	7,37	7,93	8,53	9,19	9,89	10,64
Loam argilo-arenoso	0,059	1,48	3,21	3,52	3,24	5,11	6,15	7,41	8,92
Loam argiloso	0,019	1,31	5,86	6,11	6,64	7,23	7,86	8,55	9,30
Loam argilo-siltoso	0,010	1,23	7,89	8,09	8,51	8,95	9,41	9,90	10,41
Argila-arenosa	0,027	1,23	3,34	3,57	4,09	4,68	5,36	6,14	7,04
Argila- siltosa	0,005	1,09	6,08	6,17	6,36	6,56	6,76	6,97	7,18
Argila	0,008	1,09	4,00	4,10	4,30	4,51	4,74	4,98	5,22

4) Data logger

Para a aquisição dos dados medidos pelos sensores foi utilizado um *data logger* produzido pela mesma fabricante dos sensores, para facilitar a interconexão e transmissão de dados entre instrumento e sistema aquisitor.

Para tanto, foi utilizado o *data logger ZL6 Basic*, como uma estação de coleta de dados para até seis sensores (6 portas). Além disso, a fabricante também disponibiliza gratuitamente para usuários do ZL6, o *software ZENTRA Utility*, que consiste em uma interface de transmissão e leitura de dados, por meio de um caso USB, do equipamento para um computador, sendo que os dados são lidos automaticamente de minuto a minuto, porém o armazenamento na memória (2MB) do aparelho é feito de hora em hora.

A interface do *software ZENTRA Utility* pode ser visualizada na Figura 3.16.

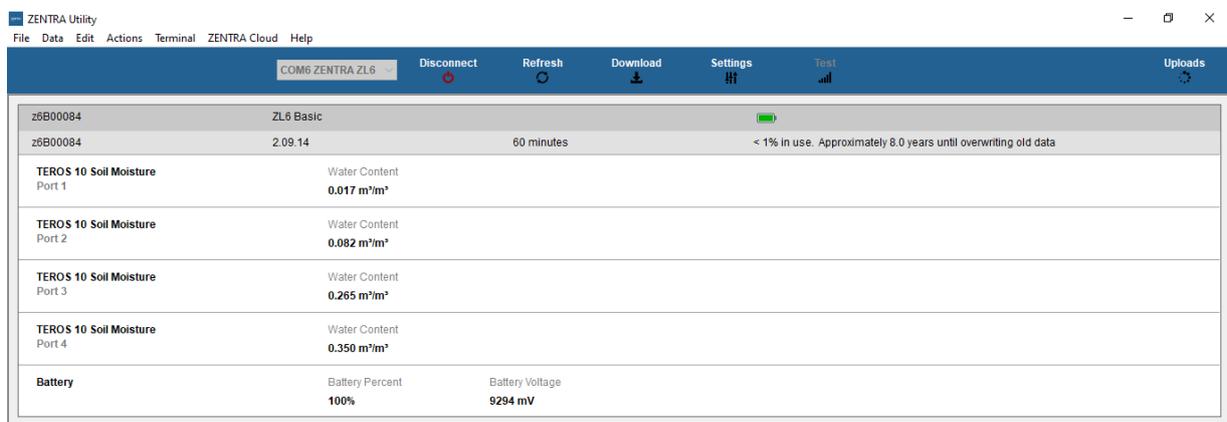


Figura 3.16: Interface do *software ZENTRA Utility* para a leitura de dados.

A grande vantagem de utilização deste *logger*, é que o mesmo foi projetado para uma configuração *plug-and-play*, em que permite aquisições de dados dos sensores a partir do momento em que o ZL6 é colocado em funcionamento.

5) Resumo dos equipamentos utilizados

Por fim, apresenta-se um resumo na Tabela 3.3 das principais características dos equipamentos TEROS 10, TEROS 21, *Mini Disk Infiltrimeter* e *ZL6 Basic* utilizados para a instrumentação geotécnica do modelo reduzido.

Tabela 3.3: Principais características do sistema de monitoramento do Modelo Físico

Equipamentos	Descrição	Quantidade	Medição/ Leitura	Intervalo de Medição/ Leitura	Volume de Influência
Data Logger	ZL6 Basic 6 Canais	02	θ e ψ_m	60 s	-

Sensor de Umidade	TEROS 10	06	Atividade dielétrica aparente (ϵ_a)	0,00 a 0,64 m ³ /m ³	430 ml
Tensiômetro	TEROS 21 ou MPS-6	06	Permissividade dielétrica	-9 a -100.000 kPa	pontual
Infiltrômetro de Disco	<i>Mini Disk Infiltrometer</i>	01	Taxa de infiltração sob tensão	Dependerá da taxa de infiltração	pontual

3.5 Programa Experimental

Nesta etapa de trabalho foram definidos o passo a passo das atividades de construção do escopo desta tese. O programa experimental foi então delineado para contemplar: (i) uma fase de testes, (ii) para determinar parâmetros hidráulicos e mecânicos do solo, (iii) para calibrar o sistema de chuva artificial e os sensores de umidade, (iv) para a montagem do modelo físico reduzido de talude e preparação do ensaio e, por fim, (v) o planejamento e execução dos ensaios para diferentes cenários de análise.

Nos tópicos seguintes cada etapa será apresentada e discutida separadamente.

3.5.1 Fase de testes

A proposta de execução de um programa de testes foi efetuada com o intuito apenas de experimentar a metodologia e antecipar as possíveis dificuldades e problemas antes da montagem do modelo físico principal, dada às suas dimensões e a quantidade de solo a ser manejada. Desta forma, enfatiza-se que não foram esperados resultados robustos para efeitos de comparações com o modelo físico de talude principal, mas sim a coerência dos dados encontrados.

Portanto, uma caixa de simulação em pequenas dimensões foi projetada, podendo esta ser visualizada na Figura 3.17 (a-b). A caixa foi construída para possibilitar a execução de dois ensaios simultâneos, facilitando a repetitividade em curtos períodos de tempo, para que fossem avaliados os métodos construtivos, as técnicas de manejo do solo, a regulação da intensidade da chuva artificial e a qualidade de medição dos sensores eleitos para a instrumentação dos modelos.

Esta caixa será aqui denominada de *caixa teste* e seguirá com esta referência para que não haja confusões associadas ao *Equipamento Experimental* proposto. Desta forma, esta caixa possui as dimensões de: 60 cm (comprimento) x 60 cm (largura) x 30 cm (altura) e foi construída sobre uma plataforma (ou mesa de aço) com a base na altura de 80 cm para facilitar a trabalhabilidade e ergonomia.

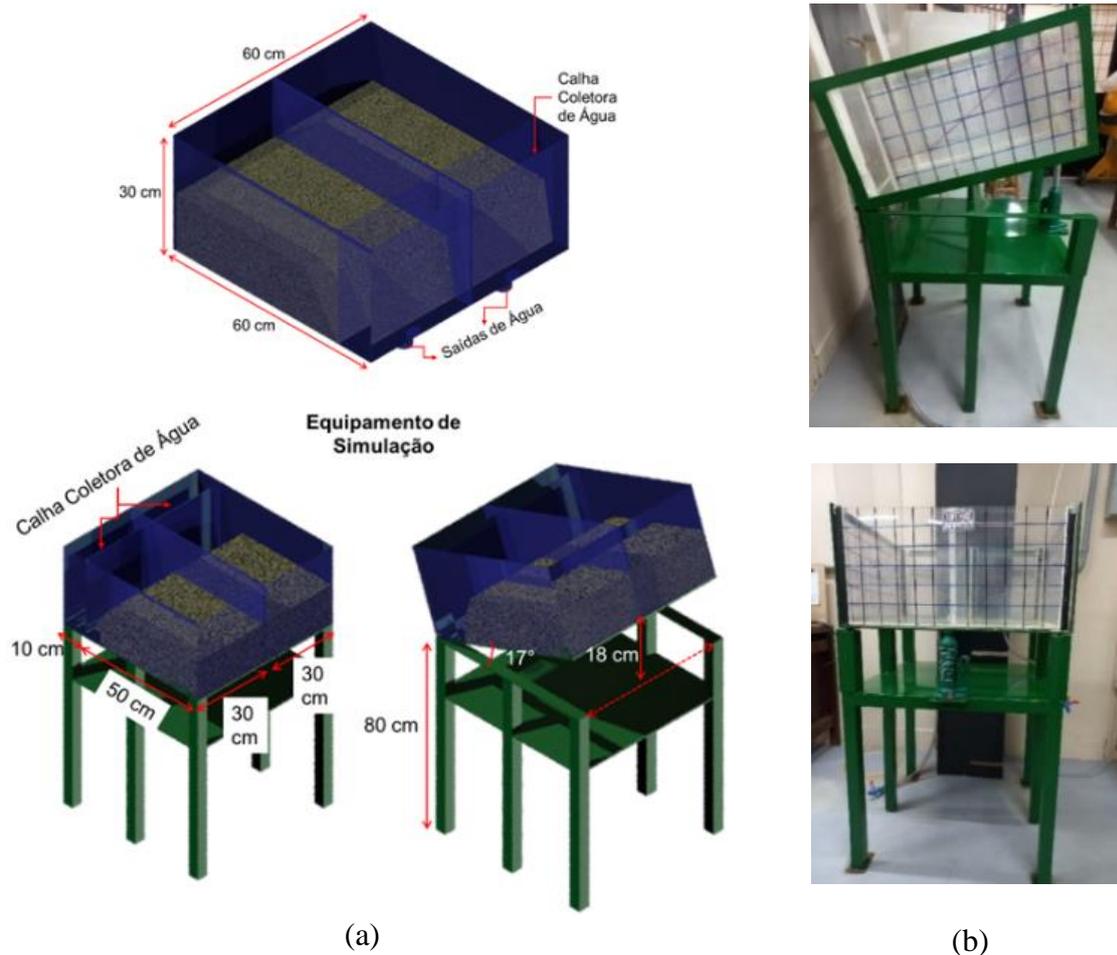


Figura 3.17. Modelo físico do equipamento teste de simulação. (a) Esquema ilustrativo sem escala. (b) Foto do equipamento de simulação montado.

A *caixa teste* construída nas dimensões supracitadas foi dividida ao meio, além disto, as placas de acrílico das laterais foram utilizadas para possibilitar a observação das frentes de umedecimento e de quaisquer fissurações ou falhas no decorrer dos ensaios. Além disto, foi previsto uma calha no espaço interno do aquário para a livre saída de água derivada do escoamento.

Com a pretensão de possibilitar uma movimentação em torno do seu eixo, a estrutura metálica de suporte foi projetada para permitir inclinações na caixa de acrílico com auxílio de um macaco hidráulico tipo garrafa, que permitiu uma elevação na base da caixa de no máximo 18 cm, produzindo uma rotação de até 17° , como demonstrado na Figura 3.17-(a).

Sobre a *caixa teste* foi instalado um sistema de chuva artificial composto por quatro nebulizadores reguláveis do tipo *Rain Bird X360 ADJ*. A intensidade de aspersão de chuva pôde ser controlada pela abertura de cada um dos quatro registros de esfera $3/4''$. Toda a estrutura de molhamento está ilustrada na Figura 3.18.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.18. Sistema de simulação artificial de chuva. (a) Foto dos quatro aspersores *Rain Bird* do tipo X360 ADJ utilizados; (b-c) Fotos em perspectiva e frontal do sistema de simulação de chuva artificial, respectivamente.

Para o suprimento de água, foi utilizado um tanque de armazenamento de capacidade de 200 L. A água armazenada foi bombeada para os aspersores a partir da utilização de uma minibomba d'água de alta pressão, com uma taxa constante de bombeamento de cerca de 55 mca (539 kPa). A conexão com mangueiras de silicone permitiu a condução da água do reservatório até a chegada nos aspersores.

Para evitar um grande desperdício de água pelo sistema de aspersão, foi desenvolvido um sistema de retroalimentação de água, conforme o esquema ilustrativo apresentado na Figura 3.19. Nesta figura, as setas vermelhas representam a condução de água do tanque principal até o modelo físico e, em seguida, a coleta até o tanque secundário; e as setas azuis indicam a saída de água do segundo tanque para retroalimentar o tanque principal.

Vale a ressalva de que foi observada uma economia expressiva de água por meio deste sistema desenvolvido, portanto este mesmo *layout* também foi utilizado para o Equipamento Experimental principal.

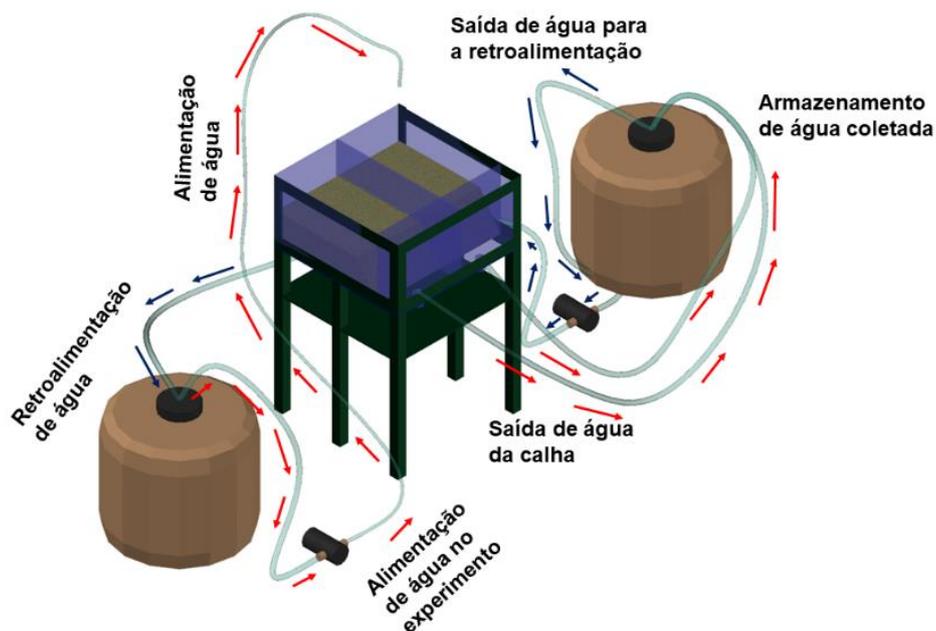


Figura 3.19. Esquema ilustrativo do processo de retroalimentação de água no modelo reduzido.

A verificação da homogeneidade de aspersão foi realizada para garantir um posicionamento adequado dos aspersores, para que um lado da caixa não receba mais água que o outro. Desta forma, foi feito um teste em que foram colocadas dez cápsulas de alumínio de cada lado da caixa, conforme o posicionamento ilustrado na Figura 3.20.

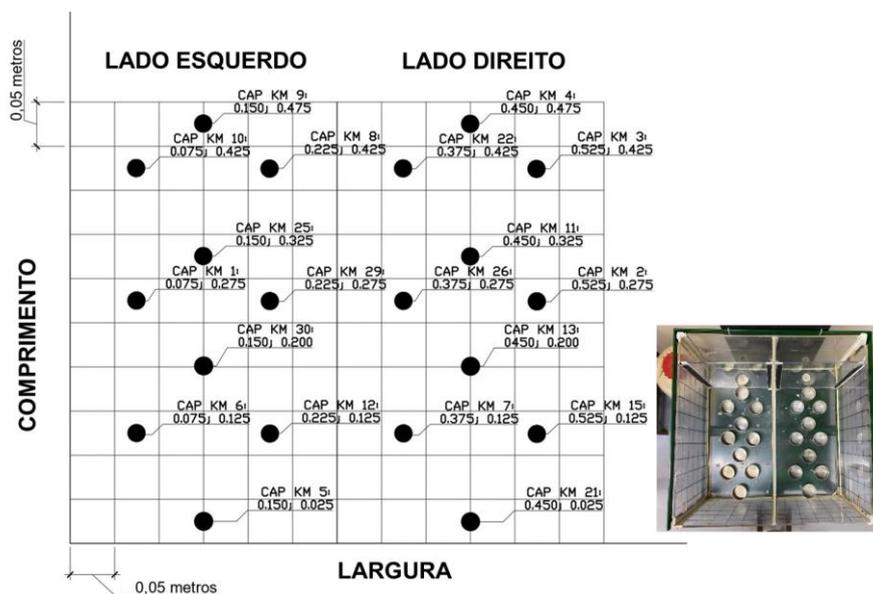


Figura 3.20. Posicionamento das cápsulas para teste de homogeneidade de aspersão.

Cada cápsula foi pesada em balança de precisão de 0,01 g antes de ser posicionada no interior dos dois lados da caixa. Efetuado o posicionamento, o teste de aspersão foi iniciado e

o tempo de ensaio ocorreu no período de 5 min. A partir dos dados, foi possível corrigir o posicionamento dos bicos dos aspersores para os locais onde receberam as menores quantidades de chuva e melhorar a homogeneidade de aspersão. Após a correção foi determinada uma precipitação de 115 mm/h que foi adotado para os ensaios.

Para a compreensão do comportamento da areia em relação ao processo construtivo do talude, a indução do processo de saturação e, por conseguinte, a ruptura do modelo, utilizou-se o mesmo solo planejado para o modelo reduzido principal. As principais características deste solo foram informadas no item 3.3. Para esta fase, foram utilizados cerca de 100 kg do mesmo material para a execução de testes neste equipamento.

A respeito da instrumentação nesta etapa, foram utilizados: 04 unidades do TEROS 10, 04 unidades do TEROS 21 e 01 unidade do *data logger* ZL6 Basic. Relacionado aos sensores de umidade e tensiômetros, foram efetuados alguns testes de verificação da coerência de resultados registrados. Este tipo de monitoramento foi fundamental em ambos os sensores para verificar algumas questões que somente a experiência prática pode solucionar, como: estado inicial de monitoramento do solo, determinação do tempo de equilíbrio de medição, posicionamento dos sensores no interior do maciço.

Assim, o procedimento de testagem foi análogo para os dois aparelhos e consistiu no monitoramento do comportamento de 700 g da areia fina. Esta quantidade foi disposta em cada um dos 4 potes de plástico com capacidade total de 750 ml. Cada um dos potes continha amostras de solo em diferentes estados iniciais de umidade (θ_i) de 0, 5, 10 e 15%, nos potes de número 1 ao 4, nesta sequência, e foi monitorado o decaimento da umidade pela secagem ao ar até atingir o equilíbrio em um período de 24 horas. A representação do teste do sistema de instrumentação pode ser observada na Figura 3.21.



Figura 3.21. Testagem da instrumentação geotécnica. (a) TEROS 10; (b) TEROS 21

Para o alcance das umidades desejadas foram adicionadas certas quantidades de água em cada pote, que foram calculadas conforme a equação que se segue:

$$P_w = \frac{P_h (h - h_h)}{(1 + h_h)} \quad (3.4)$$

onde, P_w é o peso da água (M); P_h é o peso da amostra de solo úmida (M); h é a umidade desejada (%); e h_h é a umidade higroscópica determinada para o ambiente do laboratório (%).

Com a Eq. 3.4, determinou-se as quantidades de 0, 16, 57 e 98 ml para serem adicionados nos potes de número 1, 2, 3 e 4, nesta ordem.

Após a homogeneização manual do solo, o material foi disposto nos potes enumerados e os sensores foram adicionados em seu interior, sendo totalmente cobertos com a areia fina. Posteriormente, os sensores foram conectados ao data logger *ZL6 Basic* e a aquisição de dados foi efetuada por 24 horas. Os resultados obtidos durante o monitoramento podem ser observados na Figura 3.22.

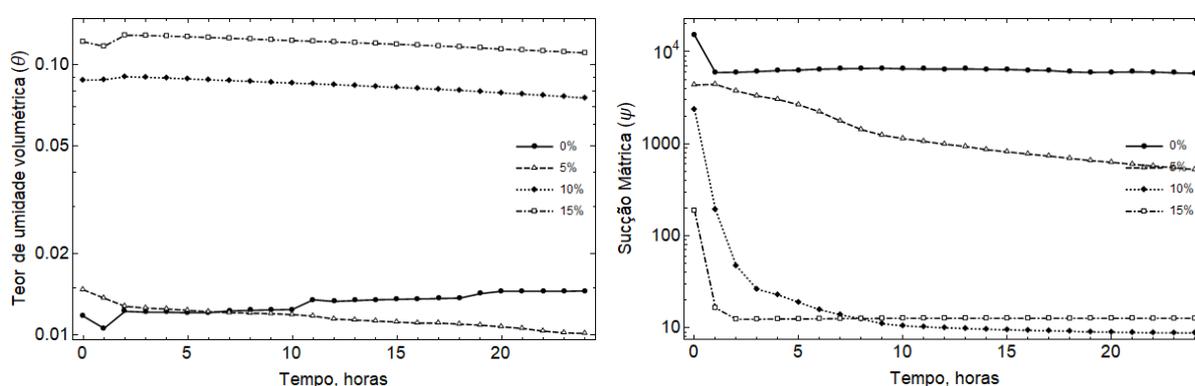


Figura 3.22: Testagem da instrumentação geotécnica em solos com umidades iniciais de 0, 5, 10 e 15%. (a) TEROS 10; (b) TEROS 21.

Na Figura 3.22-a observa-se o decaimento da umidade em todas as curvas, exceto do pote de nº1 à umidade de 0%, em que houve um crescimento da curva, fato que pode ser explicado devido à tendência de equilíbrio da umidade do solo com a do ambiente. Enquanto que nas curvas apresentadas na Figura 3.22-b, pôde-se notar uma tendência de decaimento de todas as curvas relacionadas à diminuição da sucção.

Entretanto, sabe-se que em teoria, os valores de sucção deveriam aumentar com a diminuição do teor de umidade, fato que não ocorreu neste caso. Porém, este resultado foi o esperado e está condizente com o manual do sensor, a respeito do período de equilíbrio do disco poroso com o meio onde este está inserido, por isso o disco que se encontrava inicialmente seco, ganhou umidade para se igualar à umidade do solo. Desta forma, foi observado na figura um decréscimo da curva até alcançar um patamar constante de estabilização, em que a umidade do disco alcançou a respectiva umidade do solo em cada pote.

Como conclusão, este comportamento demonstra que para a obtenção de dados mais confiáveis, necessita-se de um período de estabilização dos sensores, de no mínimo 24 h, para que os mesmos reflitam o comportamento real do solo.

Após a preparação e calibração dos componentes, prosseguiu-se com a etapa de ensaios na *caixa teste*, em que o *layout* de ensaio foi disposto de acordo com a ilustração da Figura 3.23.

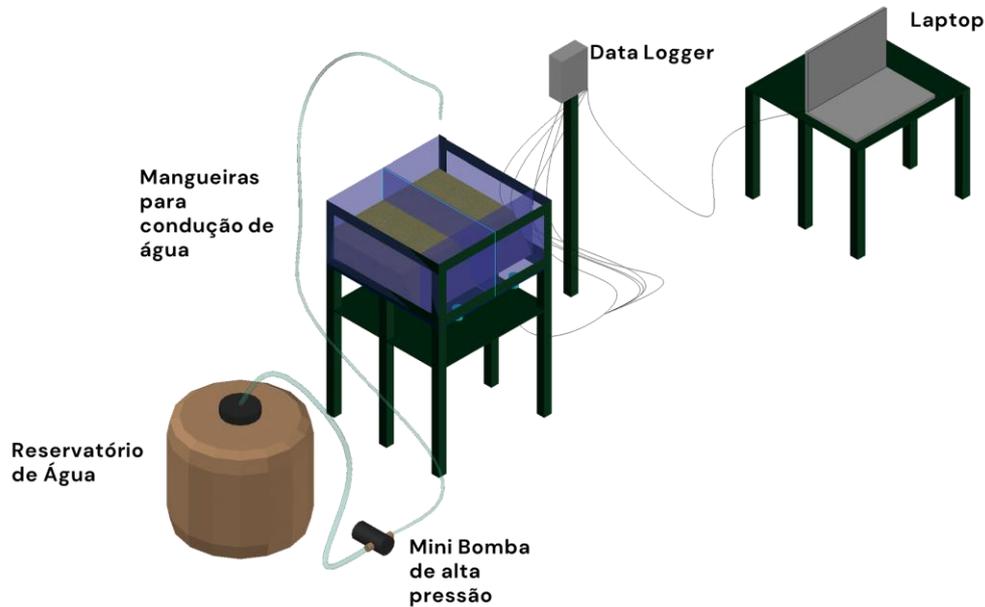


Figura 3.23. Ilustração do *layout* de ensaio na etapa de testes.

Para a montagem do maciço de solo na *caixa teste* foram testadas algumas configurações, sendo a que melhor se adequou à caixa foi a apresentada na Figura 3.24. Para a construção foi necessária a quantidade total de 84 kg de solo arenoso fino, conforme a faixa granulométrica apresentada na Figura 3.10, sendo 42 kg utilizados para a construção de cada lado da caixa. Nesta figura também estão ilustrados o posicionamento dos sensores de acordo com a profundidade do talude, tendo como referência de $z = 0$, a superfície do talude.

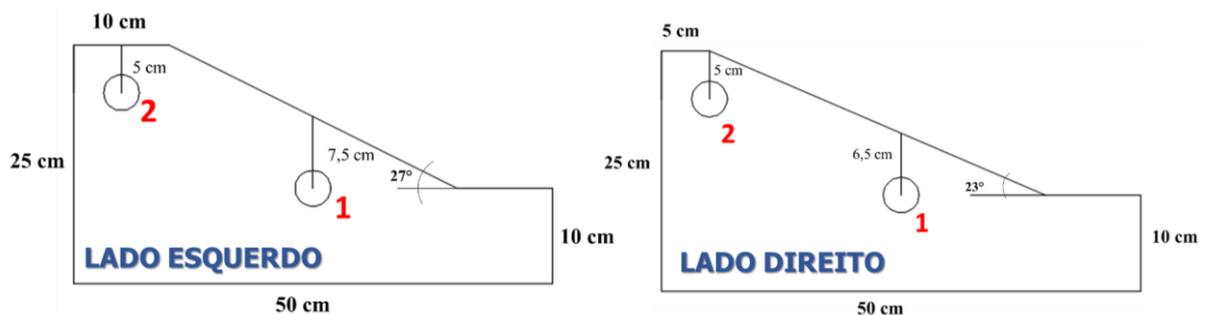


Figura 3.24. Definição das geometrias do talude e posicionamento dos sensores para o Lado Esquerdo (*LE*) e Lado Direito (*LD*).

Para a montagem dos taludes, tiveram que ser definidos os índices de vazios natural do solo (e_{nat}), com base na testagem de diferentes densidades relativas. Desta forma, para a caracterização do estado de uma areia, deve ser avaliado o estado de compacidade em que o

solo se encontra. Portanto, esta avaliação é realizada dentro do intervalo entre o e_{min} e o e_{max} , em que o e_{nat} se encontra. O cálculo da compacidade ou densidade relativa foi determinada por:

$$CR = \frac{e_{max} - e_{nat}}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (3.5)$$

onde, CR é a compacidade relativa ou densidade relativa do solo (%); e_{max} é o índice de vazios máximo; e_{min} é o índice de vazios mínimo; e e_{nat} é o índice de vazios natural do solo.

Em resumo, os valores dos parâmetros físicos para em cada um dos lados da *caixa teste*, podem ser observados na Tabela 3.4:

Tabela 3.4: Parâmetros físicos da areia fina conforme a umidade inicial (h_i) e a compacidade relativa (CR) adotadas

	Lado Esquerdo (LE)	Lado Direito (LD)
Umidade inicial (h_i)	10%	5%
Compacidade Relativa (CR)	70%	60%
Índice de vazios natural (e_{nat})	0,80	0,83
Massa específica aparente seca (ρ_d)	1,45 g/cm ³	1,43 g/cm ³
Massa específica natural (ρ_{nat})	1,60 g/cm ³	1,51 g/cm ³

Após a definição dos parâmetros da Tabela 3.4, o modelo físico do LE foi o primeiro a ser montado. Assim, foram separados 42 kg de material e adicionados 3,4 L de água para o alcance de 10% de umidade. A homogeneização da areia foi realizada por meio de uma betoneira e, neste período, também foram retiradas porções da areia e colocados em cápsulas de alumínio para aferições da umidade inicial por secagem em estufa.

A compactação do solo foi efetuada com o auxílio de um soquete do ensaio de Proctor Normal, por camadas de 5 em 5 cm, respeitando as seguintes quantidades da base até a crista, respectivamente de: 12; 12; 8,4; 6,0 e 3,6 kg. Durante o processo, foram acoplados horizontalmente no solo um sensor de umidade mais um tensiômetro na condição inicial saturada na posição 1 e mais dois sensores destes na posição 2, de acordo com a ilustração da Figura 3.24. Neste lado de *caixa teste* foram dispostos ao total 4 sensores (2 sensores de umidade e 2 tensiômetros).

A construção do modelo físico no LD foi análoga ao anterior, porém foram adicionados somente 1 L de água em 42 kg de solo e homogeneizados na betoneira para o alcance de 5 % de umidade. As camadas foram construídas com as quantidades de: 12; 12; 9,2; 6,0 e 2,8 kg e

no posicionamento 1 e 2, conforme Figura 3.24, foram adicionados os conjuntos de sensores, totalizando em 2 sensores de umidade e 2 tensiômetros.

Com os dois modelos físicos montados, a *caixa teste* foi coberta por um papel filme para minimizar a perda de umidade durante o período de estabilização das medições, e os sensores foram plugados no *logger ZL6 Basic* para aquisição de dados em tempo real. Na Figura 3.25 estão ilustrados os momentos pós-montagem dos modelos.

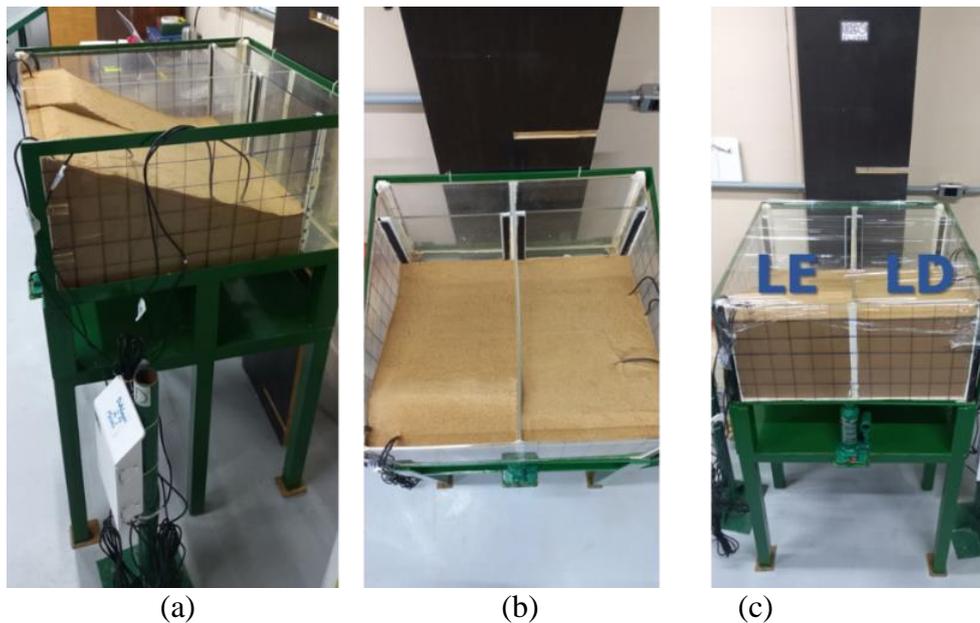


Figura 3.25. Montagem do talude na *caixa teste*: (a) Vista lateral; (b) Vista superior; e (c) *caixa teste* coberta por papel filme.

Os dois modelos físicos foram mantidos em repouso por um período de cerca de 330 horas para o *LE* e de cerca de 90 horas para o *LD*. Passados este período, foi dado início aos ensaios com a indução de uma chuva artificial de 115 mm/h. O ensaio teve duração total de 32 minutos com a chuva sendo mantida constante em todo o ensaio e não foram verificados grandes problemas no monitoramento realizado pelos sensores. As fotografias dos estágios dos ensaios podem ser visualizadas na Figura 3.26-(a-d).

Durante a execução do ensaio foi possível perceber a franja de umedecimento (Figura 3.26-b), devido a infiltração; e em seguida, formou-se uma película de água superficial e alguns veios derivados do escoamento superficial (Figura 3.26-c). A respeito da água escoada superficialmente no modelo físico, esta parcela foi coletada pela calha e armazenada na bombona secundária que ao completar quase a totalidade de sua capacidade, era reconduzida à bombona principal.

O critério de parada para a finalização do ensaio foi dado no momento em que houve o rompimento apenas do talude do *LD* em cerca de 30 min do início do ensaio. Alguns segundos antes do rompimento total, foram percebidos uma crescente abertura dos sulcos produzidos pelo escoamento e deslizamentos ocorridos da crista até o pé do talude do *LD* (Figura 3.26-c), evidenciando o tipo de ruptura superficial não-circular com o aparecimento de fissuras de tensão no topo e no pé do talude.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.26. Ensaio de simulação de uma chuva artificial sobre o modelo reduzido até o rompimento. (a) Início do ensaio; (b) Observação da frente de umedecimento; (c) Aparecimento de sulcos derivados do escoamento superficial e (d) Deslizamento superficial do talude do *LD*.

Na Figura 3.27-(a-b) estão apresentadas as leituras dos sensores de umidade durante o período de 32 min de ensaio, e em seguida, na Figura 3.28-(a-b), estão apresentados os resultados dos tensiômetros para o mesmo período de ensaio.

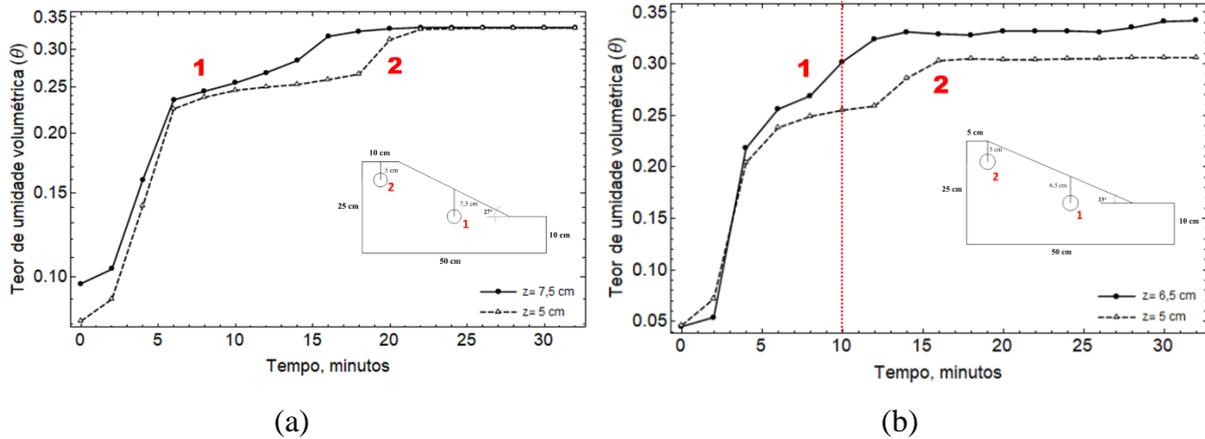


Figura 3.27. Resposta dos sensores de umidade TERSO 10 no período de ensaio. Leitura de dados: (a) Talude do LE; (b) Talude do LD com a indicação do início do aparecimento de zonas de fragilidade.

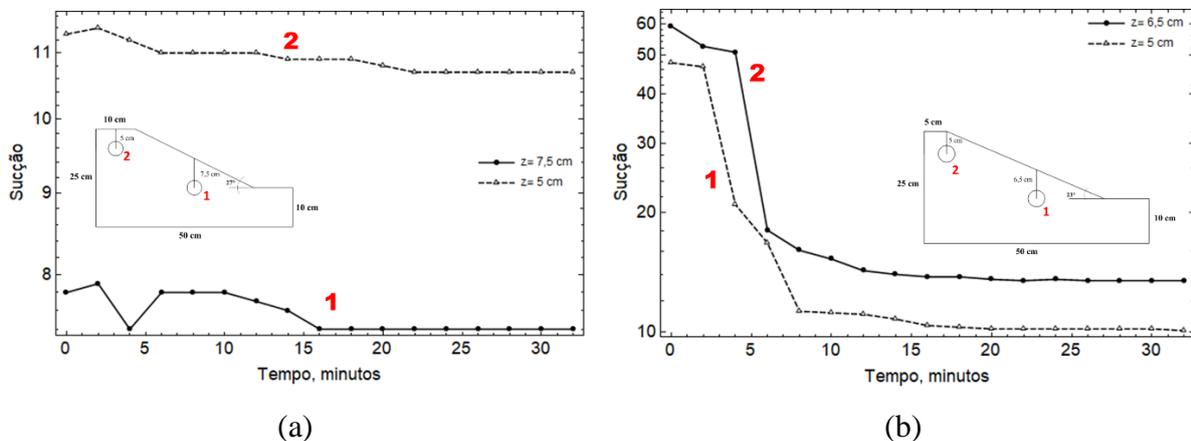


Figura 3.28. Resposta dos tensiômetros TERSO 21 no Período de Ensaio. Leitura de dados: (a) Talude do LE; (b) Talude do LD.

Ao analisar ambos os gráficos da Figura 3.27-(a-b), podem-se inferir três estágios de comportamento da curva de umidade: (1) rápido crescimento; (2) transição; e (3) constância.

Desta forma, observa-se que nos primeiros 5 min de ensaio, houve um rápido crescimento da umidade para ambos os modelos, derivado do preenchimento dos vazios do solo por água. Este comportamento é comumente percebido em solos não saturados quando sujeitos à infiltração, devido seu estado natural apresentar-se parcialmente saturado, possibilitando a entrada rápida de água nas camadas mais superficiais.

Em seguida, ocorreu o que foi chamado de zona de transição para um patamar constante, em que houve um aumento da umidade, devido a aproximação do ponto de saturação nos macroporos do maciço de solo.

Entretanto, ainda nesta fase, foi percebido no talude do *LD* o início do processo de instabilização, a partir dos 10 min, com o aparecimento de zonas de fissuração por tensão. O que pôde-se perceber de mais importante neste ensaio, é que a ruptura superficial começou em momento anterior ao patamar constante observado na Figura 3.27-(b), em que é deduzido que houve a saturação dos macroporos.

A respeito da leitura dos tensiômetros, ilustradas Figura 3.28-(a-b), aponta-se um comportamento interessante, sendo este relacionado à condição inicial do disco poroso, em que na Figura 3.28-(a), o disco já havia sido instalado no modelo reduzido do *LE* após um período de saturação prévia, portanto o mesmo já se encontrava com níveis de sucção baixos. Enquanto que no modelo do *LD*, representado pela Figura 3.28-(b), os sensores haviam sido instalados sem uma saturação prévia do disco, o que conferiu valores de sucção maiores e que no momento da aplicação da chuva artificial, o processo de saturação foi melhor observado e representado.

Na Figura 3.28-(a-b), mesmo que pequeno a decréscimo observado nos valores de sucção, os resultados estão teoricamente coerentes, quando relacionados ao aumento de umidade nos pontos 1 e 2 instrumentados

Posterior à análise dos resultados, retornou-se à *caixa teste*, visto que não houve um rompimento do modelo físico do *LE*. Assim, cinco dias após o primeiro ensaio foi realizado um segundo ensaio, porém acrescentando uma inclinação de 17° na *caixa*. A documentação fotográfica pode ser visualizada na Figura 3.29-(a-c).

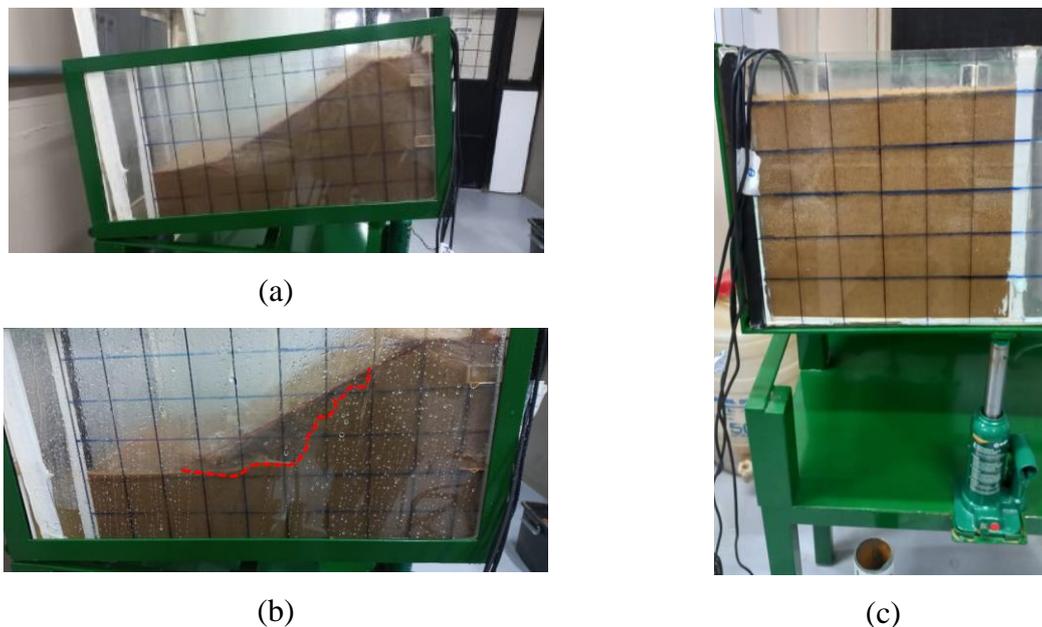


Figura 3.29. Ensaio de simulação somente para o *LE* com inclinação da *caixa teste*. (a) Vista lateral da caixa inclinada; (b) Demarcação em vermelho da região erodida e (c) Deslizamento superficial do talude do *LD*.

Depois de inclinada a *caixa teste*, foi religado o simulador de chuva artificial para o início do ensaio. A intensidade de precipitação foi mantida constante, no valor de 115 mm/h. Visualmente, notou-se uma quantidade notável de massa de solo erodida (Figura 3.29– (b)), principalmente nas bordas, devido ao aumento do escoamento superficial de água. Todavia, o simulador de chuva foi desligado após o período de 90 min, por não ter havido mudanças importantes no talude e nas leituras dos sensores geotécnicos. As leituras do teor de umidade volumétrica e da sucção podem ser visualizadas na Figura 3.30- (a-b).

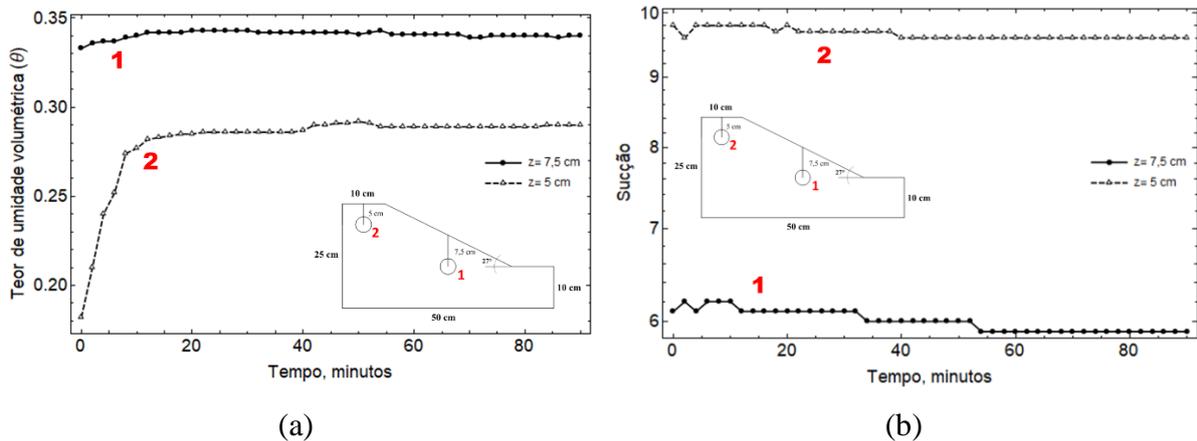


Figura 3.30. Resposta dos sensores período de ensaio com inclinação da *caixa teste* em 17° .

Leitura de dados: (a) TEROS 10 e; (b) TEROS 21.

Por meio da análise de ambas as curvas do gráfico da Figura 3.30-(a), foi notado que não houve grandes alterações nos valores de θ , do sensor posicionado no ponto 1, que esteve a 7,5 cm da face do declive e em uma região abaixo do ponto 2, o que sugere-se que a umidade fluiu por gravidade da região do topo para a base do talude, elevando a saturação no ponto 1.

Enquanto que a leitura do sensor da posição 2, mostrou um acréscimo de θ de 0,18 para 0,28. Desta forma, é conferida esta elevação à maior proximidade com a superfície do talude, fato que induziu à maior perda de umidade para o ambiente e, conseqüentemente, facilitou o ganho de umidade pelos macroporos durante a infiltração de água.

Porém, ao observar os resultados da Figura 3.30-(b), os valores de sucção, mais uma vez, não acompanharam as mudanças de umidade nem mesmo para a posição 2, onde as mudanças nos valores da umidade foram mais expressivas. No entanto, mesmo que tenha sido uma mudança tímida, os valores de sucção ainda decresceram com o processo de infiltração.

Como conclusão desta etapa, pontua-se que em relação à criação de uma *caixa teste* e a realização de um período destinado somente para a testagem e experimentação da metodologia foi indispensável para entender a física do fenômeno de instabilização e, também, para a previsão de possíveis problemas no Equipamento de Simulação proposto.

3.5.2 Determinação dos parâmetros hidráulicos e mecânicos da areia fina

Após a etapa de testes, foram efetuados os ensaios para a determinação dos parâmetros hidráulicos e mecânicos do material. Assim, as grandezas hidráulicas necessárias para a caracterização do solo, foram: a curva *SWRC* da areia, a infiltração acumulada (*IA*) e o k_{nsat} . Para a caracterização mecânica, as grandezas necessárias foram a determinação: da coesão aparente (c) e do ângulo de atrito interno da areia (ϕ').

1) Parâmetros hidráulicos

Primeiramente, para a determinação dos parâmetros hidráulicos optou-se pela estimação da curva e das grandezas hidráulicas supracitadas, por meio de métodos de estimação baseados no processo de infiltração e umedecimento do solo. Esta escolha foi tomada, devido à falta de tempo hábil para a determinação, principalmente da curva *SWRC* da areia por meio de métodos como o da câmara de pressão de *Richards*, que o procedimento de ensaio pode levar meses, fato que prejudicaria o cumprimento das atividades dentro do cronograma planejado, visto que o tempo para a conclusão já havia sido replanejado por razão da pandemia de COVID-19.

Porém, vale ressaltar que estas determinações não foram prejudicadas em vista da existência de alternativas confiáveis de cálculo. Segundo Naik & Pekkat (2022), a *SWRC* experimental estimada diretamente da infiltração, corresponde ao processo de umedecimento e é mais realista na descrição do fluxo na zona não saturada. Portanto, os meios usuais de estimação tem sido as medições de infiltração em campo, em laboratório e medições com a utilização de infiltrômetros de disco.

Portanto, para estas determinações foi utilizada a metodologia defendida por Naik & Pekkat (2022), em que por meio da instrumentação de uma coluna de solo por sensores de umidade e tensiômetros, foi encontrada a curva *SWRC* experimental do solo e para a determinação da infiltração acumulada (*IA*) e k_{nsat} foi realizado o ensaio com o mini infiltrômetro de disco na coluna, conforme a representação da Figura 3.31.

O ensaio foi então conduzido em uma coluna de PVC de 20 cm de diâmetro e 30 cm de altura com drenagem livre na base, onde o solo foi disposto de modo a preencher a coluna até uma altura máxima de 25 cm. Quanto às características gerais da areia fina utilizada, estas informações podem ser visualizadas no item 3.3.

Para o preenchimento da areia no interior da coluna de PVC, o material seco foi despejado em “chuva de areia” e depois compactado obedecendo o valor calculado da massa específica aparente seca da areia (ρ_s) de 1,45 g/cm³ para uma *CR* de 70%. Esta definição de valores, de *CR*, de ρ_s e de h_i , foram estabelecidos conforme a experiência adquirida na fase de

testes, discutida no item 3.5.1, em que foi percebido uma melhor trabalhabilidade do material nestas condições.

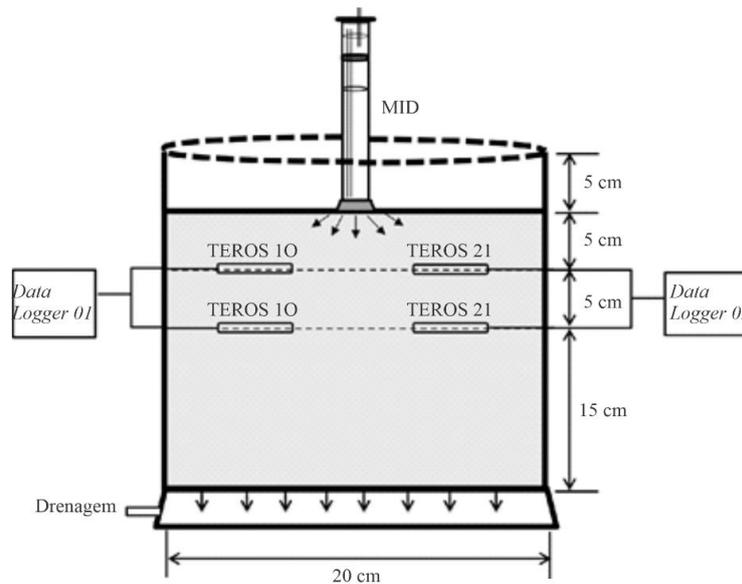


Figura 3.31. Esquema ilustrativo do *layout* de ensaio para a determinação do *SWRC* por umedecimento.

A instrumentação foi composta por 02 tensiômetros e 02 sensores de umidade. Estes aparelhos foram dispostos horizontalmente e aos pares nas profundidades indicadas, conforme a representação do processo de montagem da Figura 3.32-(a-c), nas profundidades de 5 e 10 cm, em relação à superfície de solo. Estes conjuntos de sensores indicaram os pontos experimentais da curva *SWRC*.

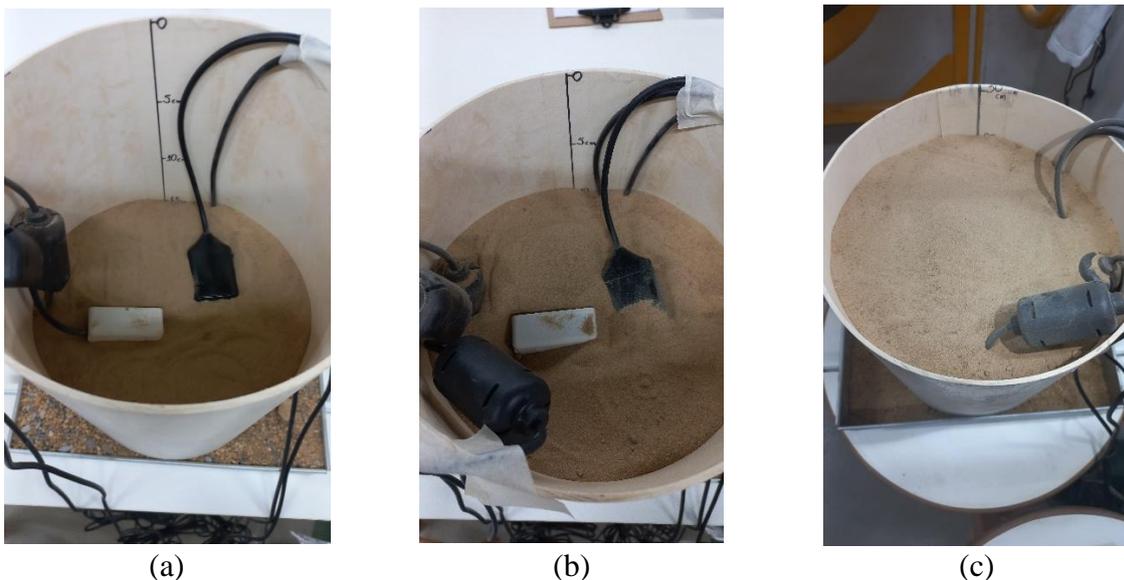


Figura 3.32. Procedimento de instalação dos sensores de umidade e tensiômetros: (a) a 10 cm da superfície de solo; (b) a 5 cm da superfície de solo; e (c) cobrimento dos sensores até 5 cm do topo da coluna de PVC.

Apesar dos sensores de umidade já possuírem uma calibração de fábrica, para garantir a máxima precisão das medições de θ de acordo com o material geotécnico trabalhado, os sensores TERS 10 foram calibrados segundo o procedimento indicado por Shaikh *et al.* (2019) e Naik & Pekkatt (2022).

Anteriormente à montagem dos sensores ilustrada na Figura 3.32-(a-c), foi realizado um procedimento similar ao da Figura 3.21, em que foram instrumentados três diferentes recipientes contendo areia seca, que foi sendo umedecida ao longo do tempo. Nestes recipientes foram coletadas amostras após cada processo de umedecimento e determinadas as respectivas umidades gravimétricas (w), por meio de secagem em estufa.

Os valores obtidos de w foram convertidos para θ por meio da equação que se segue:

$$\theta = w \times \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (3.6)$$

onde, ρ_w é a massa específica da água [M.L⁻³].

Em seguida, os valores de θ foram correlacionados com as respostas dos sensores, correspondendo à contagem bruta do aparelho. Na Figura 3.33 está apresentada a melhor correspondência de dados obtidos e a equação de calibração mais adequada para a utilização dos TERS 10 na areia fina. Quanto aos tensiômetros (TERS 21), o disco cerâmico não é afetado pelo tipo de solo, portanto, não houve necessidade de uma calibração especial do mesmo.

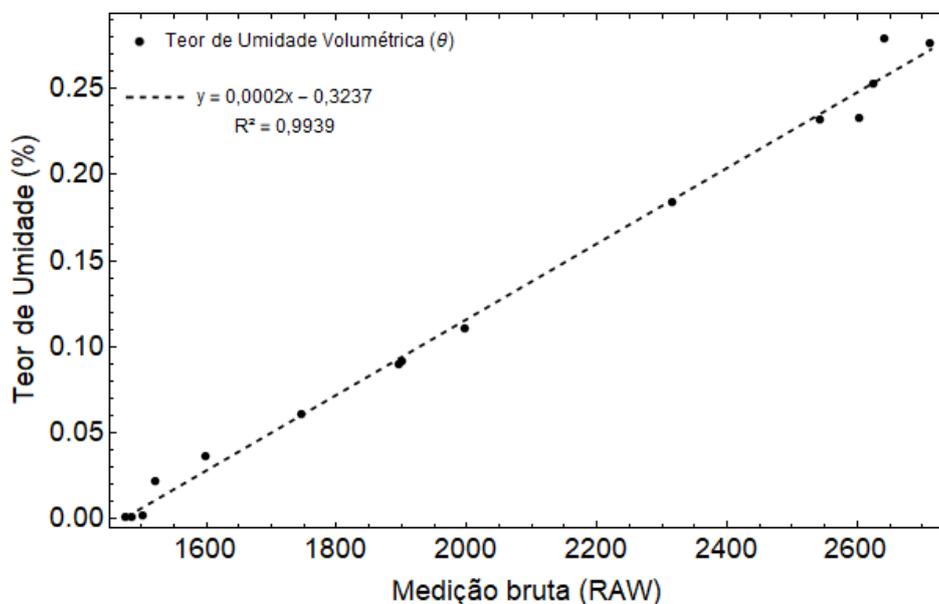


Figura 3.33. Calibração do TERS 10 para a areia fina utilizada.

Após a montagem da coluna e as calibrações efetuadas nos sensores de umidade, foi conduzido o 1º ensaio de determinação da infiltração acumulada (*IA*) com a utilização do *MID*. O ensaio foi realizado conforme recomendações do manual do fabricante, em que primeiramente foi preenchido com água a câmara de *Mariotte* e ajustada a taxa de sucção para o nível -6, valor recomendado para solos granulares; e em seguida, foi preenchido o reservatório inferior em cerca de 90 ml.

Com o *MID* posicionado sobre a superfície do solo na coluna de PVC, conforme o esquema da Figura 3.31, a infiltração de água do reservatório inferior levou cerca de 70 segundos para o completo esvaziamento do tubo e como resultado da infiltração acumulada (*IA*), pôde-se plotar a Figura 3.34.

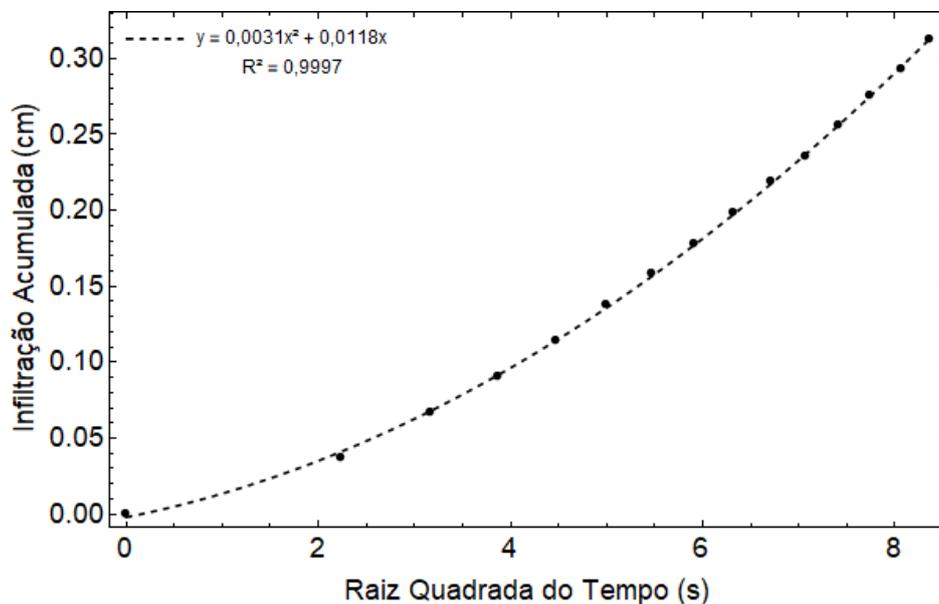


Figura 3.34. Resultado do 1º ensaio de infiltração acumulada (*IA*) medida pelo *MID* com a indicação da equação quadrática.

Conforme a equação quadrática encontrada e retomando à Eq. 3.3, no item 3.4, o valor de C_1 para as condições apresentadas foi de 0,0179 e o de A_G (parâmetro de *van Genuchten*) foi igual a 0,46, conforme a Tabela 3.2 para a areia. Substituindo os valores de C_1 e A na Eq. 3.3, obteve-se o valor de k_{nsat} , para a condição inicial apresentada na Figura 3.34, igual a $6,74 \cdot 10^{-5}$ m/s.

$$k_{nsat} = \frac{0,0179}{0,46} = 6,74 \times 10^{-3} \text{ cm} / \text{s} = 6,74 \times 10^{-5} \text{ m} / \text{s} \quad (3.7)$$

Este procedimento de infiltração e umedecimento do solo foi repetido por onze vezes e o critério de parada foi a observação dos sensores de umidade quanto à dificuldade de elevação da umidade a cada repetição do ensaio com o *MID*.

O 11º ensaio levou cerca de 135 segundos para o completo esvaziamento do tubo inferior, evidenciando uma maior dificuldade de infiltração com o aumento da umidade. Desta forma, o resultado desta nova condição pode ser observado na Figura 3.35.

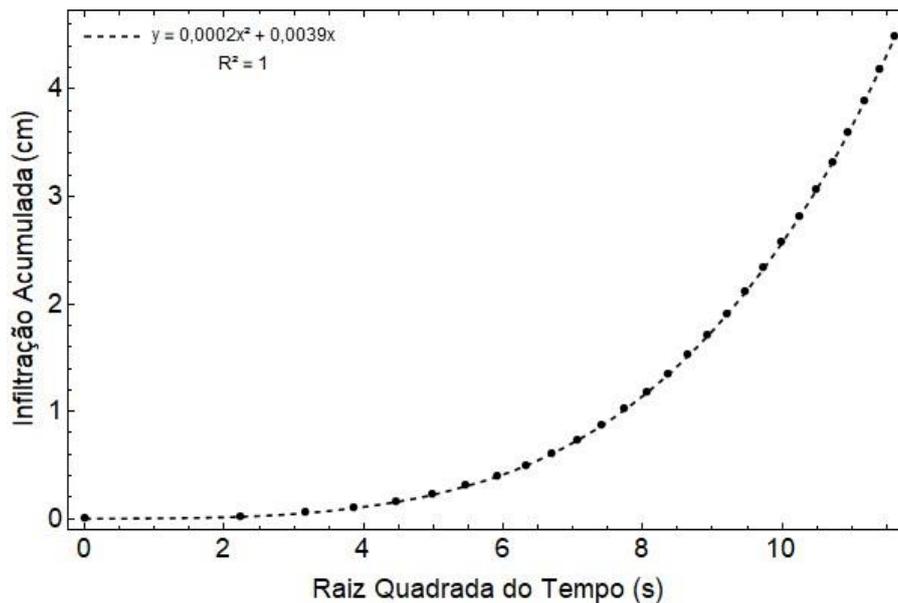


Figura 3.35. Resultado do 11º ensaio de infiltração acumulada (*IA*) medida pelo *MID* com a indicação da equação quadrática.

Similar ao procedimento ilustrado na Eq. 3.3, para a nova condição da Figura 3.35, o valor de C_1 para as condições apresentadas foi de 0,0002 e o de A continua igual a 0,46 (valor é dependente do tipo de solo). Substituindo os valores de C_1 e A na Eq. 23, obteve-se o valor de k_{nsat} igual a $4,35 \cdot 10^{-6}$ m/s. Esta diminuição do valor da condutividade hidráulica já era esperada, pois teoricamente, sabe-se que à medida que há um aumento da umidade, ocorre no solo não saturado uma diminuição da sua capacidade de infiltração.

Neste contexto, para a melhor compreensão do fenômeno ocorrido, o comportamento de solos não saturados quando existe um processo de infiltração, é dado conforme a Figura 3.36.

De acordo com o comportamento da taxa de infiltração na Figura 3.36, foi observado que quando ocorre os processos de precipitação, o solo não saturado apresenta uma grande capacidade de infiltração, em virtude de seus vazios estarem preenchidos parcialmente por água e ar. Com o prolongamento da infiltração de água, a tendência é que a capacidade de infiltração

diminua, devido ao preenchimento dos poros e se iguale à condutividade hidráulica saturada do solo (k_s). Por este motivo, do 1º até o 11º ensaio, o k_{nsat} diminuiu de $6,74 \cdot 10^{-5}$ m/s para $4,35 \cdot 10^{-6}$ m/s.

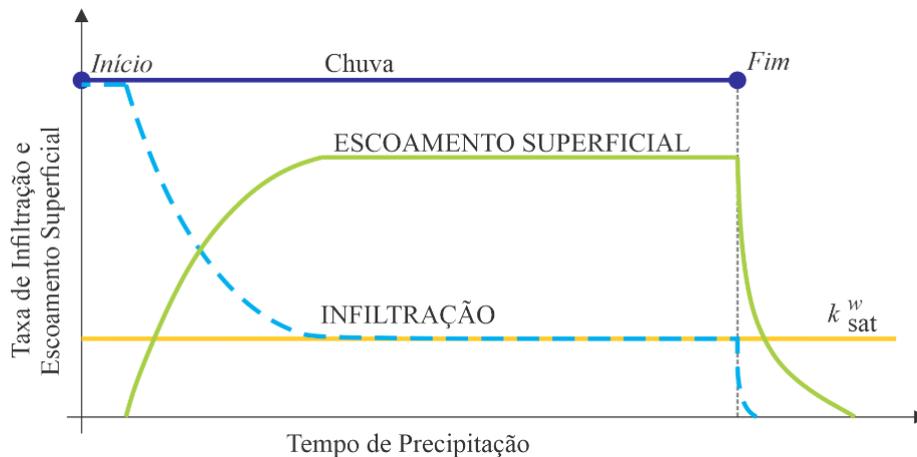


Figura 3.36. Taxas de precipitação, de infiltração e de percolação em relação ao tempo.

Quanto à ordem de grandeza de 10^{-6} medida para a condutividade hidráulica, este valor excede os valores típicos de coeficiente de permeabilidade da areia fina, segundo de Sousa Pinto (2016), que vão até 10^{-5} m/s. Porém, nesta areia fina em específico, como fora dito no item 3.3, o solo adquirido possui cerca de 15% do material contaminado por grãos menores que 0,075 mm. Desta forma, infere-se que por esta razão a condutividade hidráulica encontrada após o 11º ensaio foi de $4,35 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Após a determinação dos valores de k_{nsat} , analisou-se os pontos da curva *SWRC*, correspondente ao umedecimento do solo. Foram 11 pontos mais 02 pontos de medição referentes aos momentos imediatamente anterior ao 1º e posterior ao 11º ensaio. Assim foram encontradas as curvas de teor de umidade (Figura 3.37) e sucção (Figura 3.38) em relação ao tempo, relacionado às profundidades de 10 e 5 cm em relação à superfície do solo e a *SWRC* experimental por umedecimento da areia fina (Figura 3.39). Vale ressaltar que o tempo total de medição foi de 240 min com intervalos de umedecimento com o *MID*, sendo realizadas a cada 20 min.

A respeito da Figura 3.37 notou-se um crescimento de ambas as curvas, comportamento coerente com o esperado, devido ao umedecimento progressivo aplicado na superfície do solo pelo *MID*. Além disto, foi observado um retardo de mais de 50 min, para a primeira resposta à infiltração referente ao sensor localizado à 10 cm de profundidade, enquanto que a curva referente ao sensor localizada à 5 cm da superfície de solo já obteve uma resposta imediata já no 1º ensaio realizado pelo infiltrômetro.

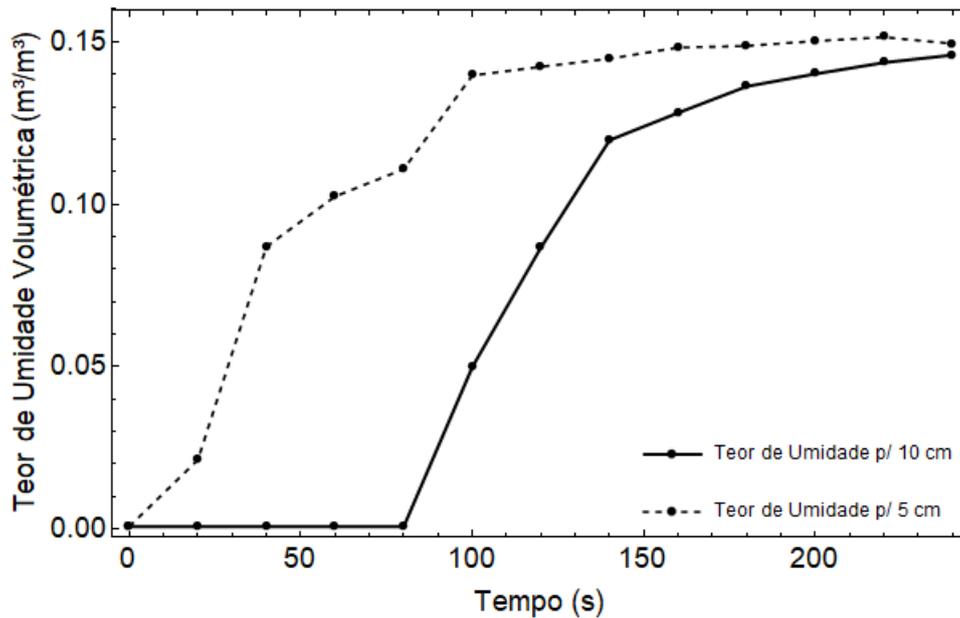


Figura 3.37. Gráfico do teor de umidade volumétrica pelo tempo, resultado do ensaio de coluna.

Além disto, vale a ressalva de que fora de um ambiente que induza a retirada de ar dos vazios do solo para o preenchimento destes com água, como ocorre no ensaio de permeabilidade, é extremamente difícil promover a saturação de um material granular, pois ocorre a situação de que o fluxo de água pode ser percolado para as camadas mais profundas ou a água pode ser evaporada para o ambiente. Neste sentido, o θ máximo medido para as condições do ensaio foi de 0,15 para as duas profundidades.

Quanto às curvas de sucção pelo tempo, ilustrada na Figura 3.38, observou-se também resultados coerentes, em que houve um decréscimo dos valores de sucção em razão da aplicação de umedecimentos sucessivos pelo *MID*.

Outro ponto observado, está relacionado ao intervalo de medição da sucção, que para um teor de umidade residual (θ_r) de 0,0006 foram medidos valores de sucção de 5441,2 kPa para 10 cm e 3780,0 kPa para 5 cm de profundidade em relação à superfície e, para os valores máximos de θ medidos, da ordem de 0,15 para ambas as profundidades, foram medidos valores mínimos sucção de 11,1 kPa e 8,1 kPa, para 10 cm e 5 cm de profundidade, respectivamente.

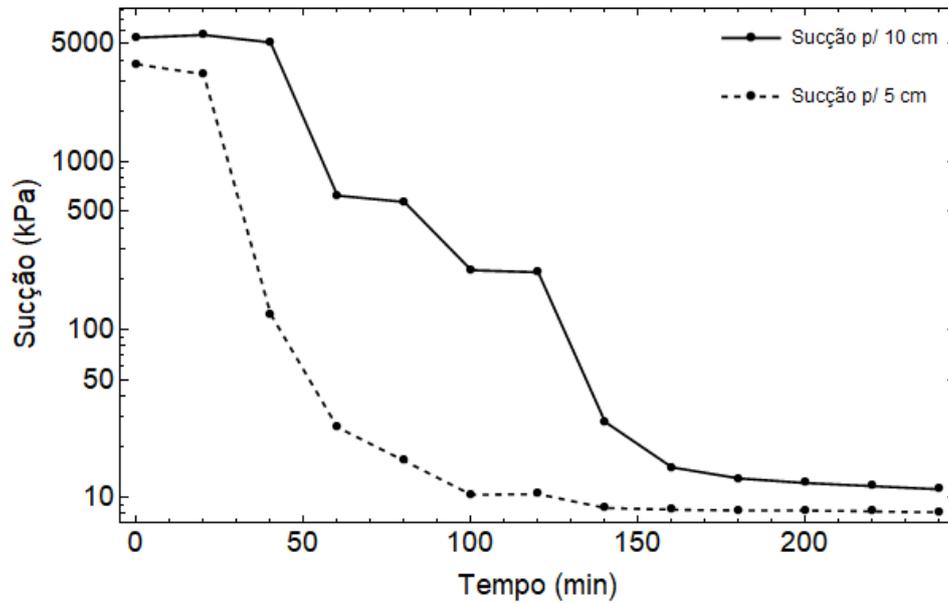
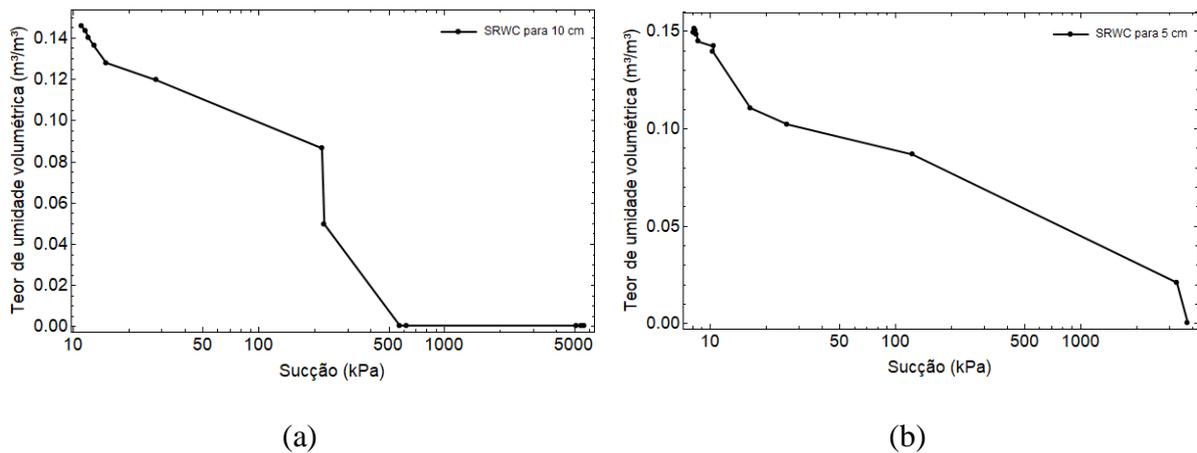
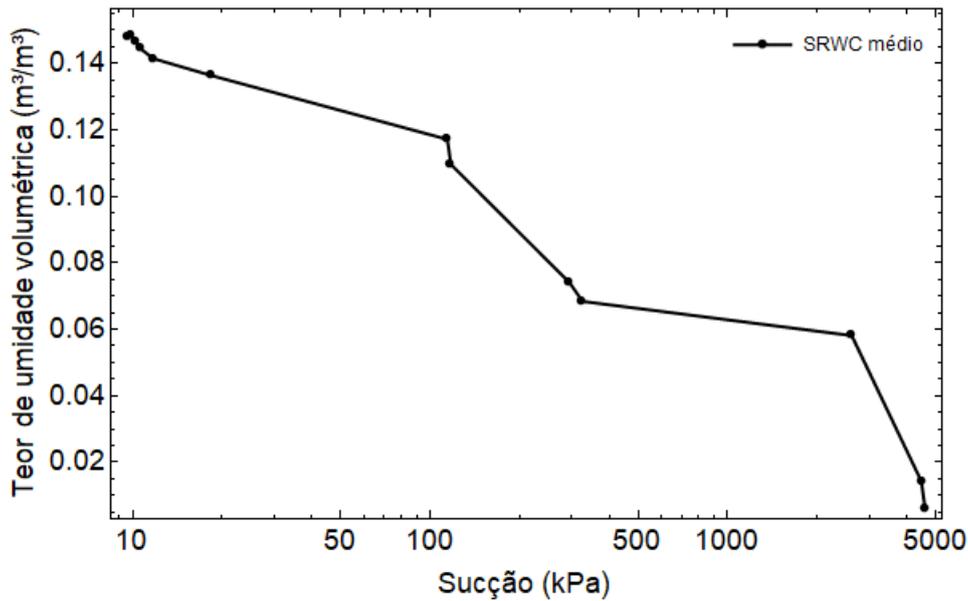


Figura 3.38. Gráfico da sucção pelo tempo, resultado do ensaio de coluna.

Com as medições de θ e ψ ao longo do tempo, foram geradas as curvas *SWRC* experimentais para as profundidades de 10 e 5 cm em relação à superfície do solo. A partir dos resultados pôde-se notar uma boa correlação entre θ versus ψ e a tendência de comportamento de uma curva característica está condizente com aquelas comumente encontradas na Literatura geotécnica, como a da Figura 2.6. Vale ressaltar também, que estas curvas da Figura 3.39, auxiliaram na previsão do comportamento do teor de umidade e sucção nas simulações no modelo físico de talude em pequena escala.





(c)

Figura 3.39. Curvas *SWRC* experimentais geradas por medições em colunas: (a) *SWRC* medido para 10 cm de profundidade; (b) *SWRC* medido para 5 cm de profundidade; e (c) *SWRC* médio.

1) Parâmetros mecânicos

Os parâmetros mecânicos da areia fina foram determinados por meio da realização ensaios de cisalhamento direto. O teste foi realizado com a preparação de uma amostra de areia fina para uma CR de 70%, h_i de 10% e ρ_{nat} de 1,60 g/cm³ para a determinação da coesão aparente (c) e do ângulo de atrito interno (ϕ') da areia para estas condições.

O ensaio foi realizado no aparelho MS102 de Cisalhamento Automático da fabricante nacional *Owntec*, conforme recomendações das normas ASTM D3080M-11 e BS 1377-7. A amostra de solo deformada foi moldada na célula de cisalhamento bipartida de dimensões de 60 mm (comprimento) x 60 mm (largura) x 20 mm (altura). Na Figura 3.40 estão apresentadas as imagens do equipamento de cisalhamento automático.

Como resultado do ensaio de cisalhamento direto, os resultados gráficos foram: tensão de cisalhamento \times deslocamento horizontal, deslocamento vertical \times deslocamento horizontal e tensão cisalhante \times tensão normal.

Na Figura 3.41 está apresentado a relação tensão de cisalhamento \times deslocamento horizontal. Nota-se que para as tensões normais aplicadas de 50, 100, 200 e 400 kPa, a tensão cisalhante aumenta com o deslocamento horizontal até as curvas alcançam valores máximos, denominadas de resistência máxima ou resistência de pico.



(a)



(b)

Figura 3.40. Ensaio de cisalhamento direto no equipamento automático MS 102 da fabricante *Owntec*: (a) Fotografia do equipamento MS 102 no Laboratório GeoFluxo – UnB; e (b) fotografia da célula de cisalhamento.

Após esse período, o deslocamento horizontal continuou aumentando, entretanto, notou-se uma leve diminuição das tensões de cisalhamento até a estabilização e constância, etapa caracterizada pelo alcance da resistência residual, que é um comportamento característico de areias compactadas. As resistências de pico para as cargas aplicadas de 50, 100, 200 e 400 kPa, foram, respectivamente de: 37,63 kPa, 76,06 kPa, 147,19 kPa e 264,32 kPa.

Na Figura 3.42 está apresentado a relação deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

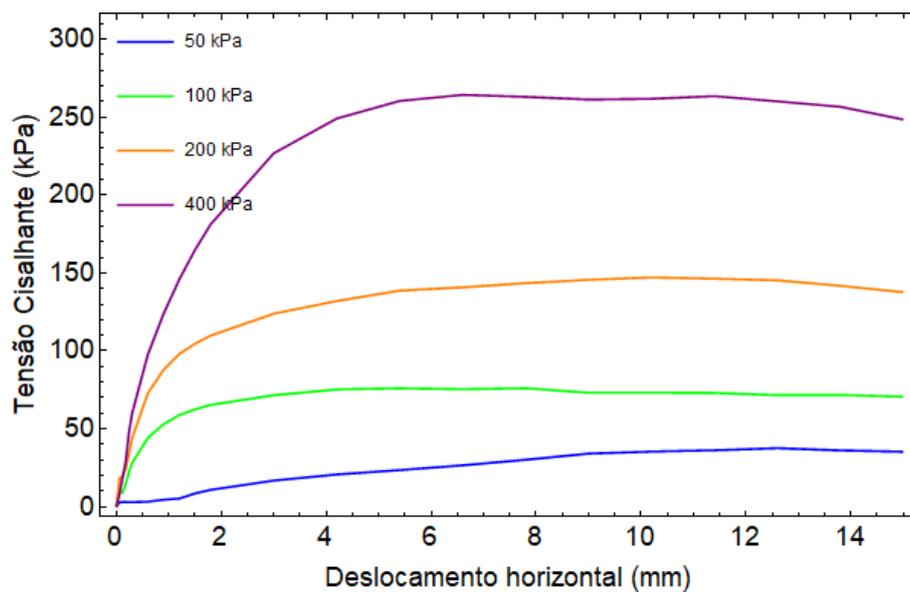


Figura 3.41. Gráfico da tensão cisalhante x deslocamento horizontal, originada do ensaio de cisalhamento direto.

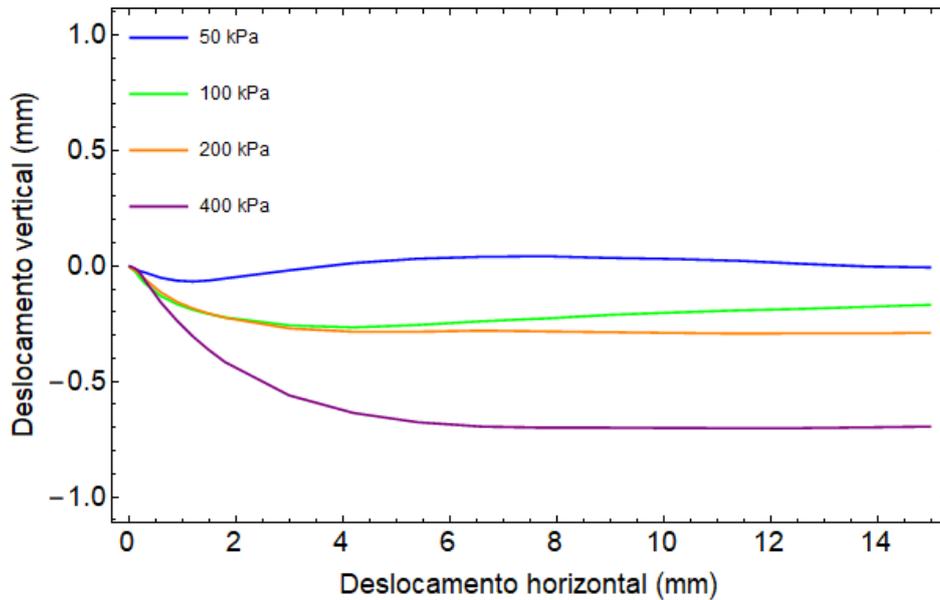


Figura 3.42. Gráfico do deslocamento vertical x deslocamento horizontal, originado do ensaio de cisalhamento direto.

Na Figura 3.42 foram apresentadas as variações lineares dos deslocamentos verticais em relação ao aumento dos deslocamentos horizontais. Portanto, verificou-se que para todas as tensões normais aplicadas, exceto para a carga de 50 kPa no período de deslocamento entre 5 a 10 mm, tiveram deslocamentos verticais negativos.

No gráfico da Figura 3.43 está apresentada a relação entre a tensão cisalhante x tensão normal, em que desta relação foram retirados importantes informações sobre o material geotécnico trabalhado, que consiste na coesão aparente (c) e no ângulo de atrito interno (ϕ') da areia para as condições iniciais de moldagem da areia fina, segundo a CR , a h_i e a ρ_{nat} supracitadas.

Vale lembrar que, em teoria, os solos granulares não apresentam coesão, porém, como a areia necessitará ser moldada no processo de construção do modelo físico de talude, o ensaio foi realizado com a amostra a h_i de 10% para o ganho de coesão aparente. Logo, os ensaios de determinação da coesão aparente e do ângulo de atrito interno, consideraram as condições iniciais de montagem, desta forma, os parâmetros mecânicos encontrados para a areia foram de: c igual a 10,83 kPa e o ϕ' igual a 32,72°.

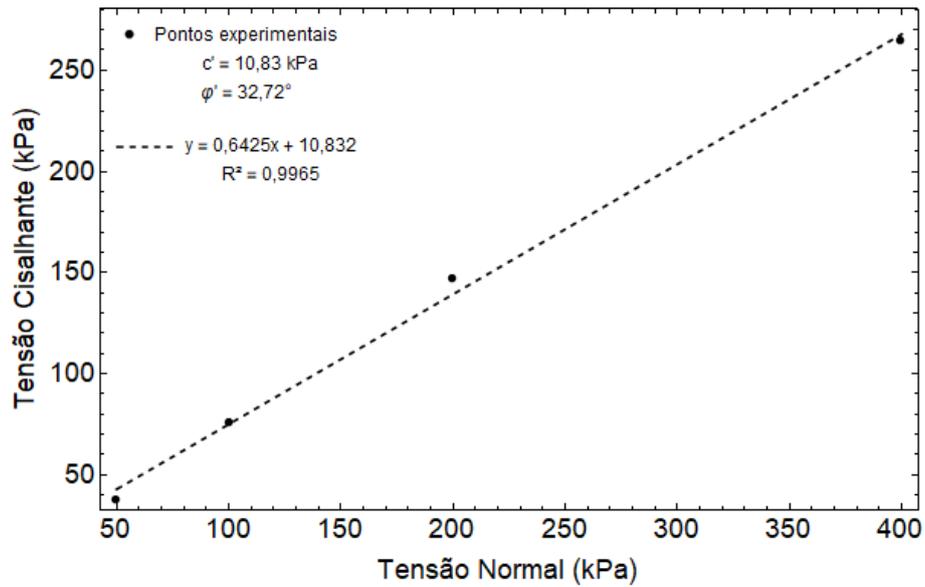


Figura 3.43. Gráfico da tensão cisalhante x tensão normal, originado do ensaio de cisalhamento direto.

3.5.3 Calibração do sistema de chuva artificial do Equipamento Experimental

O procedimento de calibração do sistema de produção da chuva artificial foi similar ao apresentado no item 3.5.1, da fase de testes. Portanto, para a verificação da homogeneidade e a intensidade de precipitação total dos aspersores, foi efetuado testes com copos sobre o topo, o declive e a base do equipamento experimental. O posicionamento dos copos pode ser verificado no esquema da Figura 3.44.

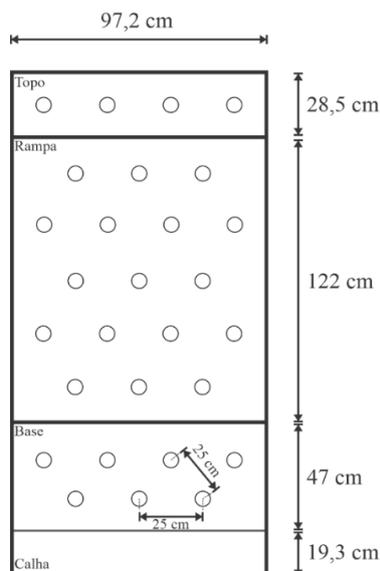


Figura 3.44. Posicionamento das cápsulas para teste de homogeneidade de aspersão e verificação das intensidades de precipitação no Equipamento Experimental. (Dimensões internas do equipamento)

Para o teste de calibração foram distribuídos sobre o topo, o declive e a base 28 copos plásticos para coleta da precipitação durante um período de 317 segundos. Desta forma, foram efetuadas três etapas de testes, sempre considerando o mesmo tempo de ensaio para todos. As etapas consistiram na alternância do ligamento e fechamento entre os 06 aspersores, de acordo com a ilustração da Figura 3.45-(a-c).

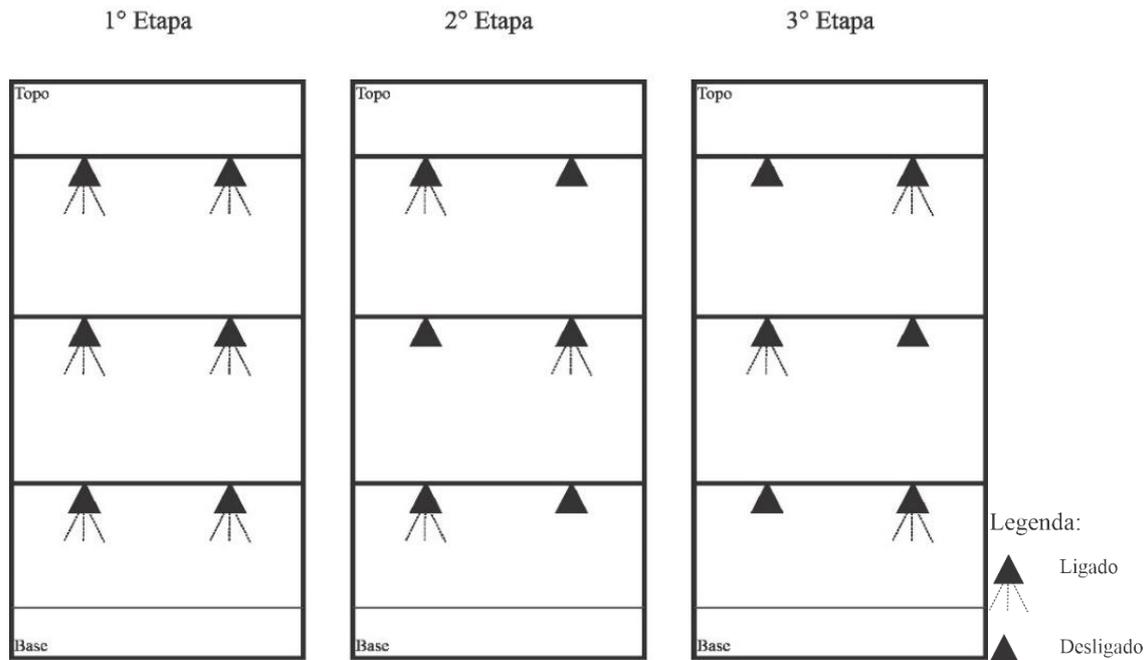


Figura 3.45. Testes em três etapas alternando o funcionamento dos 06 aspersores.

Como resultado dos testes para todas as etapas, foram verificadas uma dispersão de valores de água coletadas pelos copos, principalmente nas bordas e nas regiões do topo e base do declive, porém, as maiores intensidades ficaram concentradas no declive e direcionadas para as faixas de medição dos sensores, portanto, estando de acordo com a zona de influência de medições. Assim, as medições de intensidades de precipitação, conforme as alterações realizadas para as etapas 01, 02 e 03, foram de: 78 mm/h, 37 mm/h e 42 mm/h, respectivamente.

3.5.4 Montagem do modelo físico de talude em pequena escala

A montagem do modelo físico demandou um esforço de trabalho maior, em razão da preparação do material geotécnico para a compactação do solo no interior do equipamento. Nesta preparação, dentre as etapas realizadas, estão incluídas as características geotécnicas que foram detalhadas nos tópicos 3.3 e 3.5.2. Em resumo, na Tabela 3.5 estão listados todos os parâmetros físicos, mecânicos e hidráulicos da areia fina utilizada.

Tabela 3.5: Características gerais da areia fina utilizada na construção do modelo físico.

Parâmetros Físicos			
Parâmetros	Nomenclatura	Valor	Unidade
SUCS	SP	Areia mal graduada	-
Tamanho Efetivo da Partícula	D_{50}	0,16	mm
Coefficiente de Uniformidade	C_u	2,22	-
Coefficiente de Curvatura	C_c	0,56	-
Limite de Plasticidade	LP	NP (não plástico)	-
Massa específica dos sólidos	ρ_s	2,62	g/cm ³
Massa específica seca	ρ_d	1,45	g/cm ³
Massa específica	ρ_{nat}	1,60	g/cm ³
Densidade Real dos grãos	G_s	2,64	-
Índice de Vazios Mínimo	$e_{mín}$	0,73	-
Índice de Vazios Máximo	$e_{máx}$	0,97	-
Índice de Vazios Natural	e_{nat}	0,80	-
Porosidade	n	0,45	-
Compacidade Relativa	DR	70	%
Parâmetros Hidráulicos			
Parâmetros	Nomenclatura	Valor	Unidade
Teor de umidade volumétrica residual	θ_r	0,0006	-
Teor de umidade volumétrica saturada	θ_s	0,44	-
Condutividade hidráulica não saturada para $\theta = 0,0006$	k_{nsat}	$3,89 \cdot 10^{-4}$	m/s
Condutividade hidráulica não saturada para $\theta = 0,15$	k_{nsat}	$4,35 \cdot 10^{-6}$	m/s
Umidade inicial	h_i	10	%
Parâmetros Mecânicos			
Parâmetros	Nomenclatura	Valor	Unidade
Coesão aparente	c	10,83	kPa
Ângulo de atrito interno	ϕ'	32,72	°

Dessa forma, para a construção do modelo físico, as atividades foram divididas em 03 dias de trabalho para facilitar o manejo do solo. A geometria do talude foi dividida em 03 blocos, conforme ilustrado na Figura 3.46-(a), em que o Bloco (BL) 01, 02 e 03, refere-se à base, ao declive e ao topo, respectivamente. Cada bloco foi dividido em camadas de espessura de 10 cm, sendo o BL01 composto por 03 camadas, o BL 02 composto por 04 camadas e BL 03 também composto por 03 camadas, resultando em uma altura total de 30 cm. Quanto ao posicionamento dos sensores, os 12 sensores utilizados foram instalados em pares, de um sensor de umidade e um tensiômetro do lado esquerdo e direito, de acordo com Figura 3.46-(b), nas profundidades de: 6 cm, 14 cm e 22 cm em relação à superfície do talude.

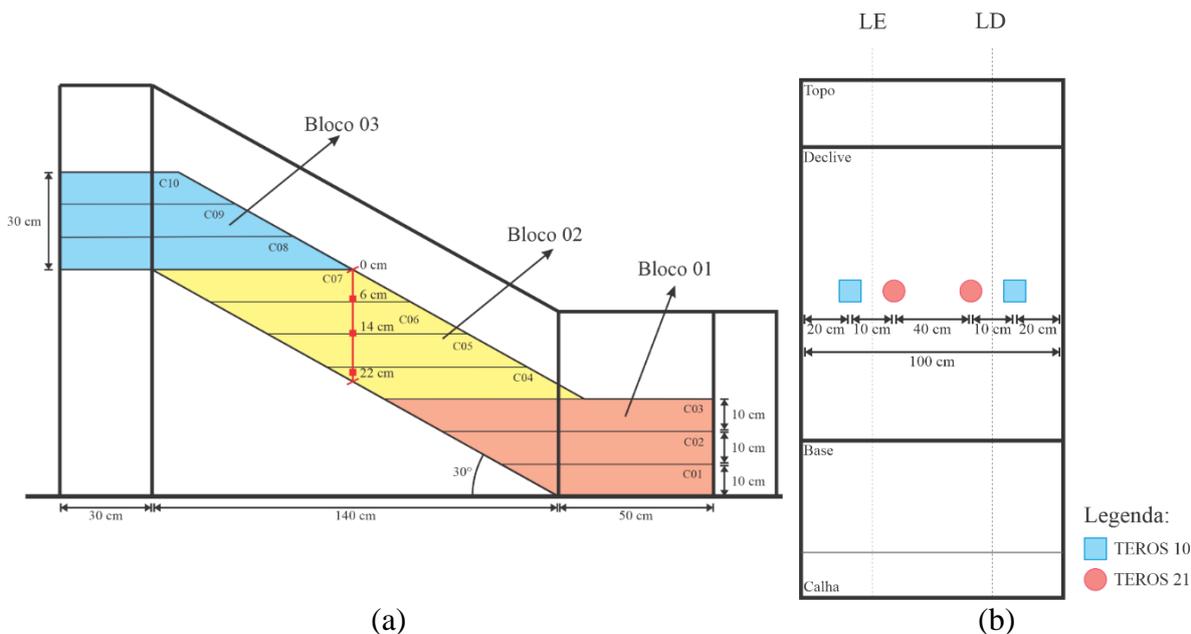


Figura 3.46. Representação dos blocos e camadas de montagem do modelo físico de talude:
(a) vista lateral; e (b) vista em planta.

A mistura do material foi realizada em uma betoneira, obedecendo as condições iniciais impostas para o solo que foram: h_i de 10%, DR de 70% e ρ_{nat} 1,60 g/cm³. Para estas condições foram calculados: a quantidade de solo seco e o volume de água a ser misturado para a moldagem do material na respectiva geometria de cada bloco. Neste contexto, as informações a respeito do volume de cada BL, as quantidades de areia seca e o volume de água a ser utilizados, estão informados na Tabela 3.6.

A respeito do processo de compactação do BL 01, no primeiro dia de trabalho, foram preparados 327,35 kg de solo e misturados na betoneira com 12,84 l de água até a completa homogeneização do material. A areia úmida de cada camada foi despejada no equipamento experimental, espalhada para o cobrimento de toda a superfície e compactada com o auxílio de um soquete de compactação do ensaio de Proctor Normal, com massa de 2500 g. Sua utilização foi realizada a fim de garantir a padronização da energia de compactação nas camadas.

Tabela 3.6: Informações das quantidades de areia e água utilizados na construção do modelo físico de talude, de acordo com a geometria indicada.

Bloco	Camada	Geometria da camada	Volume de água	Quantidade de solo seco
1	C1	54154,01 cm ³	3,26 l	83,12 kg
	C2	71095,00 cm ³	4,28 l	108,86 kg
	C3	88035,01 cm ³	5,30 l	134,80 kg
2	C4	50821,99 cm ³	3,06 l	77,82 kg
	C5	50821,99 cm ³	3,06 l	77,82 kg

	C6	50821,99 cm ³	3,06 l	77,82 kg
	C7	50821,99 cm ³	3,06 l	77,82 kg
3	C8	69567,01 cm ³	4,19 l	106,52 kg
	C9	52627,00 cm ³	3,17 l	80,58 kg
	C10	35686,01 cm ³	2,15 l	54,64 kg
Total		574452,00 cm ³	34,58 l	879,80 kg

Os golpes de soquete obedeceram a altura de queda, e foram efetuadas sobre placas quadradas de madeira, de 20 x 20 cm. As linhas guias nas paredes laterais do equipamento auxiliaram na determinação dos golpes para que cada camada não ultrapassasse a altura 10 cm. O procedimento de compactação do BL 01 pode ser visualizado na Figura 3.47-(a-f).



(a)



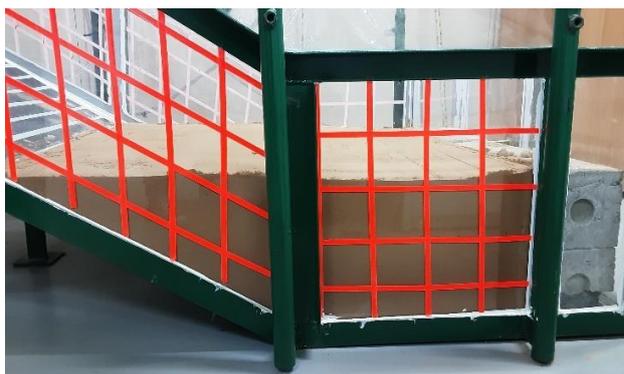
(b)



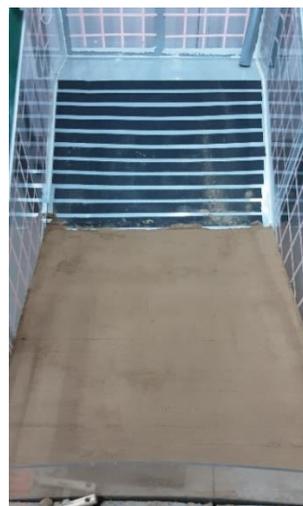
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.47: Processo de montagem das 03 camadas do Bloco 01: (a) vista lateral da primeira camada; (b) vista frontal da primeira camada; (c) vista lateral da segunda camada; (d) vista lateral da segunda camada; (e) vista lateral da regularização da terceira camada e; (f) vista frontal da terceira camada regularizada.

Na compactação do BL 02, no segundo dia de trabalho, além da preparação do solo, também foram organizados e identificados os 12 sensores (06 sensores de umidade e 06 tensiômetros) para as instalações nas profundidades indicadas de 6 cm, 14 cm e 22 cm em relação à superfície do talude.

A quantidade de solo reservada para esta etapa de montagem foi de 312,01 kg e 12,24 l de água, sendo que todo o processo de preparação, manejo e montagem do talude foi realizada da mesma forma que o BL 01.

Nesta etapa de montagem é importante lembrar algumas características de instalação dos equipamentos de monitoramento. Primeiro, todos os sensores, durante a instalação, foram posicionados horizontalmente aos pares (01 sensor de umidade e 01 tensiômetro) em relação às camadas; segundo, a condição inicial do disco cerâmico dos tensiômetros se encontrava seco no momento da instalação e, conforme recomendações do manual, as ranhuras que envolvem o disco foram preenchidas com a areia úmida do talude ao serem acopladas no solo, para garantir que toda a superfície do disco estivesse em contato com o meio, para o equilíbrio da umidade; e terceiro, o início do monitoramento e do armazenamento dos dados, começou quando os sensores foram plugados no *data logger*. Vale ressaltar que, no equipamento experimental visto frontalmente, os sensores posicionados à esquerda foram plugados no *data logger* 01 (DL1) e os da direita no *data logger* 02 (DL2).

O procedimento de compactação do BL 02, pode ser visualizado na Figura 3.48-(a-h).



(a)



(b)



(c)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 3.48. Processo de montagem das 04 camadas do Bloco 02 e a instalação da instrumentação: (a) vista lateral preenchimento de solo na região do declive; (b) vista frontal do preenchimento; (c) posicionamento dos sensores; (e) data logger 1; (f) data logger 2; (g) vista lateral do preenchimento final do declive; e (h) vista frontal da finalização da montagem no declive.

Para a finalização da montagem do modelo reduzido de talude em pequena escala, o BL 03 necessitou de 242,32 kg de areia seca para a mistura em betoneira com 9,50 l de água até a completa homogeneização. A montagem das três camadas seguiu o mesmo procedimento descrito para os blocos anteriores, até a finalização da compactação até a altura de 30 cm.

O procedimento de compactação do BL 03, pode ser visualizado na Figura 3.49-(a-f).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.49: Processo de montagem das 03 camadas do Bloco 03: (a) vista lateral da primeira camada de solo no BL 03; (b) vista lateral da segunda camada de solo no BL 03; (c) vista frontal da montagem; (d) vista lateral do talude montado; (e) vista da base do talude e; (f) vista em planta do talude.

Após a montagem completa do modelo físico de talude em pequena escala, toda a superfície do modelo foi coberta por uma lona plástica para evitar o excesso de perda de umidade para o ambiente.

Vale ressaltar que, esse período de transição ou repouso, entre a pós-montagem até o primeiro dia de ensaio com simulação de uma chuva artificial, já esteve sob monitoramento e durou cerca de 468 horas.

3.5.5 Cenários de análise

Os cenários de análise foram planejados para a observação do comportamento do talude pela resposta dos sensores, frente às variações do período e da intensidade da precipitação simulada.

Neste sentido, as análises efetuadas corresponderam ao período de repouso do modelo e mais cinco ensaios, sendo, o primeiro simulando uma chuva constante com intervalos determinados de interrupções na aspersão; o segundo foi utilizada a intensidade máxima e sem variações na precipitação; no terceiro estiveram em funcionamento 03 dos 06 aspersores a fim

de aplicar uma maior intensidade de chuva para o lado direito do equipamento experimental; no quarto ensaio foi invertido o funcionamento dos 03 aspersores para o lado esquerdo; e por fim, no quinto ensaio a intensidade de chuva foi mantida máxima nos 06 aspersores e constante durante todo o processo de umedecimento até a indução da ruptura.

Na Tabela 3.7 estão detalhadas todas as características dos ensaios realizados.

Tabela 3.7: Detalhamento dos ensaios no modelo físico de talude em pequena escala.

Informações Pós Montagem – Período de Repouso							
Início do Monitoramento		10/05/2023					
Período de Repouso		~ 20 dias (468 horas)					
Fim do Período de Repouso		30/05/2023					
Precipitação		Não					
1º Ensaio							
Dia do Ensaio		30/05/2023					
Duração		40 min					
Precipitação		Sim					
Nº de aspersores em funcionamento		06 aspersores					
Intensidade de chuva		78,2 mm/h					
Variação dos intervalos de chuva		Sim					
Períodos de chuva		05 min com chuva 05 min sem chuva 10 com chuva 5 min sem chuva 15 min com chuva					
Composição da Chuva							
Chuva	S/ chuva	Chuva	Chuva	S/ chuva	Chuva	Chuva	Chuva
0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min 40 min
2º Ensaio							
Dia do Ensaio		31/05/2023					
Duração		75 min					
Precipitação		Sim					
Nº de aspersores em funcionamento		06 aspersores					
Intensidade de chuva		78,2 mm/h					
Períodos de chuva		Chuva constante em todo o ensaio					
3º Ensaio							
Dia do Ensaio		16/06/2023 (10:50 h)					
Duração		42 min					
Precipitação		Sim					
Nº de aspersores em funcionamento		03 aspersores em funcionamento (lado direito)		-		Sim	
				Sim		-	
				-		Sim	
Intensidade de chuva		42 mm/h					
Variação dos intervalos de chuva		Sim					
Períodos de chuva		20 min com chuva (primeiros min.) 22 min sem chuva (últimos min.)					
Composição da Chuva							
Chuva	Chuva	Chuva	Chuva	S/ chuva	S/ chuva	S/ chuva	S/ chuva
0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min 42 min
4º Ensaio							

Dia do Ensaio	16/06/2023 (11:35 h)		
Duração	42 min		
Precipitação	Sim		
Nº de aspersores em funcionamento	03 aspersores em funcionamento (lado esquerdo)	Sim	-
		-	Sim
		Sim	-
Intensidade de chuva	37 mm/h		
Varição dos intervalos de chuva	Sim		
Períodos de chuva	18 min com chuva (primeiros min.) 24 min sem chuva (últimos min.)		

Composição da Chuva

Chuva	Chuva	Chuva	Chuva	S/ chuva	S/ chuva	S/ chuva	S/ chuva
0 min	5 min	10 min	15 min	18 min	25 min	30 min	35 min 42 min

5º Ensaio – Até a Ruptura

Dia do Ensaio	16/06/2023 (13:42 h)		
Duração	90 min		
Precipitação	Sim		
Nº de aspersores em funcionamento	06 aspersores		
Intensidade de chuva	78,2 mm/h		
Períodos de chuva	Chuva constante em todo o ensaio		

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Apresentação dos resultados

Neste tópico serão detalhados todos os resultados encontrados para o período de repouso (pós-montagem) mais os cinco cenários de análise apresentados no tópico 3.5.5.

Neste sentido, para a melhor compreensão dos resultados, os gráficos obtidos das respostas do monitoramento pelos sensores, serão apresentados aos pares (teor de umidade volumétrica e sucção), sendo ilustrados os resultados adquiridos pelo DL1 e DL2, em sequência, para as três profundidades de monitoramento (6 cm, 14 cm e 22 cm).

1) Período pós-montagem (repouso)

Esta etapa teve início logo após a montagem do BL 02, em que todos os 12 sensores já haviam sido plugados nos DL 01 e 02 para o acompanhamento do processo de equilíbrio dos aparelhos com as condições ambientais em que estes foram introduzidos. Este procedimento foi ilustrado na Figura 3.48.

O período de repouso durou 468 horas (aproximadamente 20 dias) e não houve simulações de chuva, pois o objetivo desta fase foi de equilibrar, tanto as condições do talude, relacionadas à troca de umidade entre as camadas, como as dos sensores, em que o intuito era de fazê-los se igualarem com as condições do meio, principalmente os discos cerâmicos dos tensiômetros. Para isto, toda a superfície do talude esteve coberta para evitar a perda excessiva de umidade para a atmosfera.

Vale ressaltar que, como esta fase passou por constantes variações, devido à acomodação do solo e as trocas de umidade entre as camadas, não foram esperados resultados robustos. Entretanto, as leituras desta fase serão apresentadas para a ilustração e o simples acompanhamento do comportamento do modelo físico nas profundidades indicadas. Desta forma, a Figura 4.1 e a Figura 4.2 ilustram o comportamento do teor de umidade e da sucção do DL1 (para o lado esquerdo). Quanto aos resultados do DL2 para este período, percebeu-se alguns erros de monitoramento em que houve períodos monitorados e outros não monitorados. Portanto, optou-se por apresentar os dados somente do DL1, entretanto enfatiza-se que este problema foi resolvido antes mesmo de serem iniciados os ensaios de simulação de chuvas de 01 ao 05.

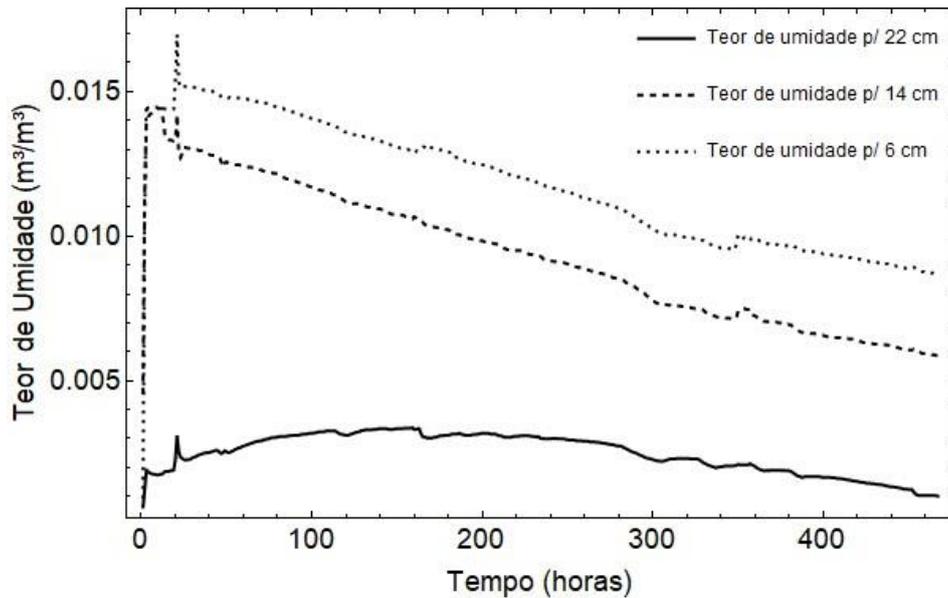


Figura 4.1. Gráfico dos resultados do teor de umidade volumétrica para o DL1 para as profundidades indicadas.

A partir da Figura 4.1 pôde-se notar um decaimento do teor de umidade (θ) em relação à maior parte do tempo nas profundidades de 14 e 6 cm. Já para a profundidade de 22 cm ocorreu um ganho de umidade em um primeiro momento, até cerca de 350 horas, que pode ser devido à posição mais profunda em relação aos outros sensores, que minimizou a perda de umidade para a atmosfera e favoreceu a troca de fluidos entre as camadas. Após este período, o comportamento mudou, apresentando também uma diminuição de θ conforme os outros sensores.

Na Figura 4.2 observou-se que o tensiômetro posicionado a 22 cm apresentou um comportamento constante até cerca de 350 horas, condizente com o período de ganho de umidade visto na Figura 4.1, e após este período houve um aumento no valor de sucção (ψ), característico com a diminuição de umidade. Para a profundidade de 14 cm, na maior parte do tempo foi observado um aumento de ψ , condizente com a diminuição de θ , porém a partir de cerca de 350 horas, a curva diminuiu inesperadamente, mesmo o teor de umidade evidenciando também uma diminuição. Quanto ao sensor da profundidade de 6 cm, o ψ aumentou gradativamente e foi o comportamento mais condizente em relação ao que foi evidenciado pelo sensor de umidade na Figura 4.1, para a mesma profundidade.

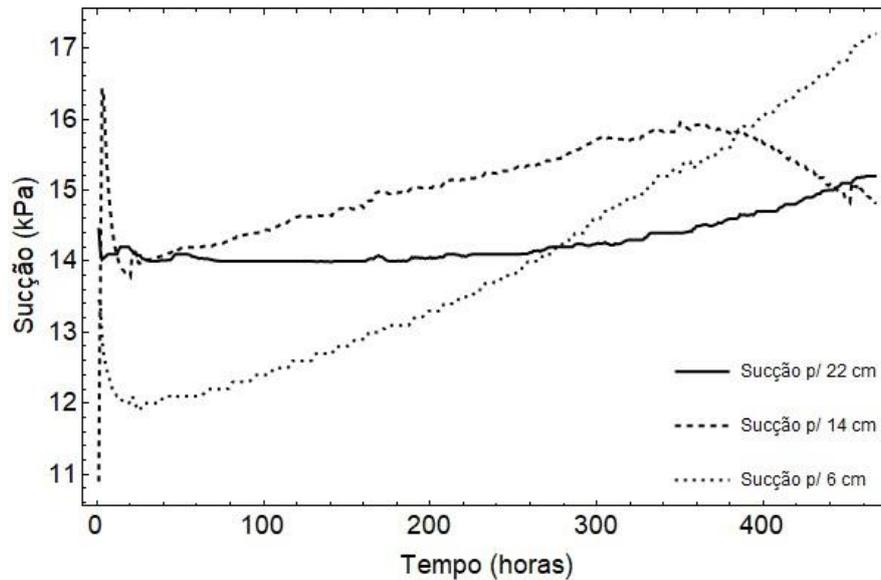


Figura 4.2. Gráfico dos resultados de sucção para o DL1 para as profundidades indicadas.

2) Ensaio 01

O primeiro ensaio foi planejado para a verificação do desempenho do talude em relação às variações dos períodos com e sem simulação de chuva. Para isto, este ensaio teve a duração de 40 min, com os 06 aspersores em funcionamento simulando uma chuva de intensidade de 78,2 mm/h para intervalos de 5, 10 e 15 min com chuva e entre estes períodos, tiveram dois de 05 min sem chuva. Na Figura 4.3, está indicado o diagrama de intensidade e o acumulado de chuva que alcançou aproximadamente a ordem de 43 mm.

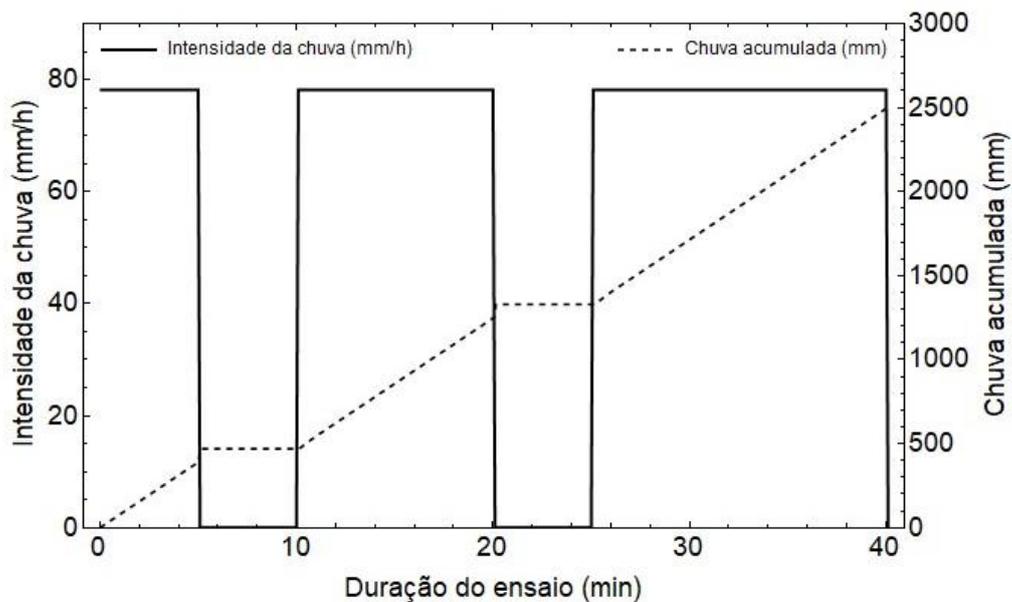


Figura 4.3. Diagrama da intensidade de chuva em mm/h e a chuva acumulada em mm durante o 1º Ensaio.

Na Figura 4.4 e Figura 4.5 estão apresentados os resultados do DL1 para o θ e ψ , nesta ordem. Em seguida, na Figura 4.6 e Figura 4.7 estão apresentados, nesta sequência, os resultados do DL2 para o θ e ψ .

Conforme pode-se observar na Figura 4.4, os sensores de umidade posicionados a 6 e a 14 cm da superfície responderam mais rapidamente aos efeitos hidráulicos da precipitação. Neste sentido, as curvas começaram a mudar seu comportamento a partir dos 15 min de ensaio, quando foi medido um acumulado de cerca de 14,3 mm de água precipitada.

Após esse período, o solo que apresentava um teor de umidade residual, ocasionado pela evaporação de água, devido ao longo intervalo de repouso do talude, ganhou umidade e o θ , para as profundidades indicadas, saiu de um valor residual para o alcance de valores superiores a 0,12 no fim do ensaio.

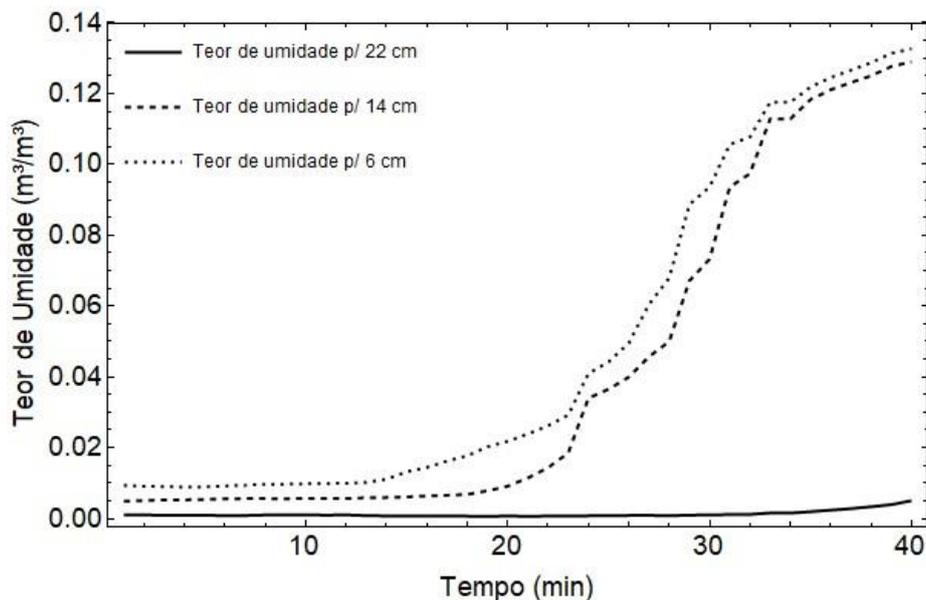


Figura 4.4. Gráfico do 1º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.

Quanto ao sensor posicionado na profundidade de 22 cm, a resposta da instrumentação foi retardada, sendo verificada uma mudança de comportamento somente após os 35 min, em que foi preciso uma chuva acumulada de 35 mm para o θ desta região sair do estado estacionário de θ_r .

A respeito da Figura 4.5, a sucção para a profundidade de 22 cm se manteve estável durante os 40 min de ensaio, pois não houve grandes alterações de θ , condição que pode-se inferir que mesmo com a precipitação aplicada, a infiltração de água não chegou à esta

profundidade. Desta forma, a sucção medida manteve-se em cerca de 15 kPa, valor que advém desde o período em o talude esteve em repouso.

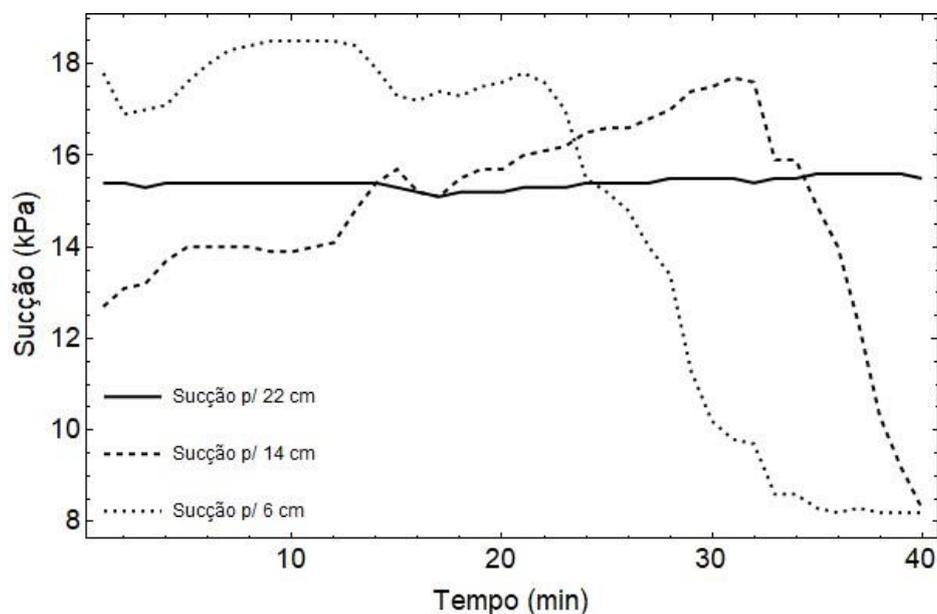


Figura 4.5. Gráfico do 1º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.

Na medição do tensiômetro para 14 cm de profundidade, verificou-se que nos primeiros 15 min em que θ medido esteve constante, o valor de ψ teve um comportamento crescente. Esta situação, traduz melhor a condição da camada que, mesmo até este período, a água precipitada ainda não havia chegado à esta profundidade. Após este tempo, já observou-se uma variação de θ , porém a curva de ψ ainda seguiu em crescimento até cerca de 32 min. Este atraso de 12 min na mudança de comportamento de ψ , está relacionado ainda ao equilíbrio das condições de umidade do solo com o disco cerâmico dos tensiômetros, pois, logo após este período, a curva decresce abruptamente até 8 kPa, momento em o sensor traduz a resposta de ψ frente a infiltração de chuva.

Para o tensiômetro posicionado mais superficialmente, a 6 cm, a resposta de ψ ocorre mais rapidamente. Segundo a Figura 4.4, θ respondeu à infiltração a partir dos primeiros 15 min. Já na Figura 4.5, até 15 min a curva manteve-se inconstante, oscilando entre 18,5 e 15 kPa até o 22º min, em que a partir daí, ψ começou a responder pela infiltração e a curva decresceu até 8 kPa.

Quanto aos resultados de θ para o DL2, observa-se na Figura 4.6 que somente o sensor de umidade posicionado a 6 cm apresentou uma curva crescente mais expressiva que os sensores a 14 e a 22 cm. Para a curva representando θ a 6 cm da superfície, nota-se que o

aumento da umidade com a saturação se deu a partir de 13 min do início do ensaio, sendo que o maior crescimento ocorreu nos últimos 5 min do ensaio.

Diferentemente dos dados apresentados no DL1, o aumento da saturação para o sensor posicionado a 14 cm foi pouco significativo, saindo de θ de 0,01 em 20 min para 0,02 ao final dos 40 min de ensaio. Já para o sensor na profundidade de 22 cm, observa-se pouca variação, podendo-se inferir que mesmo com a aplicação de 43 mm de chuva aplicada, foi pouca a quantidade de água infiltrada até esta profundidade.

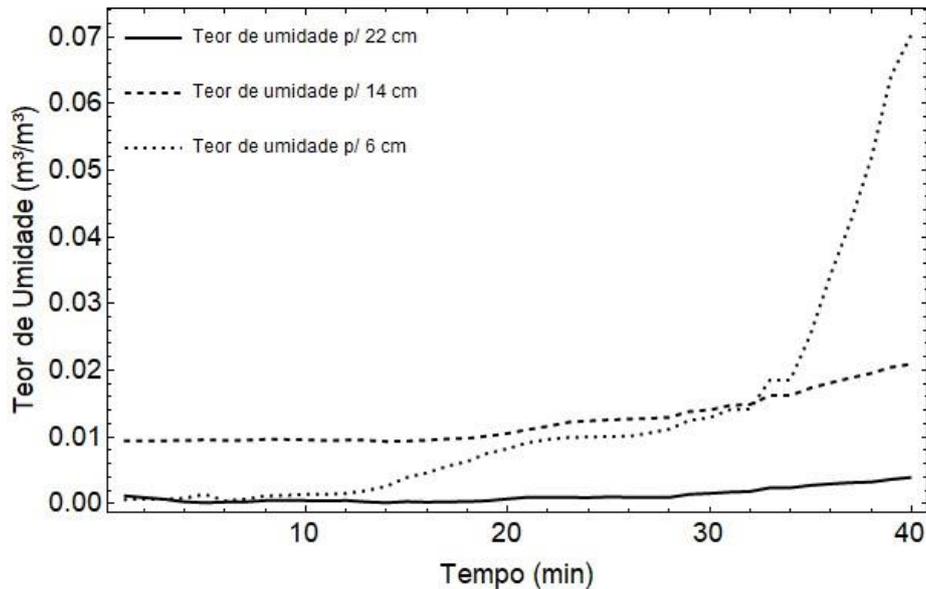


Figura 4.6. Gráfico do 1º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.

Para os valores de ψ adquiridos pelo DL2, é importante esclarecer que apesar de todos os cuidados tomados com a verificação da funcionalidade de todos os equipamentos na sua pré-instalação, o tensiômetro plugado no *data logger 2* do lado direito, posicionado na profundidade de 22 cm parou de funcionar durante todos os ensaios, embora tenha sido realizadas todas ações remotas de fazê-lo funcionar, como: desplugar e plugar o sensor, executar a solução de problemas remoto pelo *software* da fabricante (*Zentra Utility*).

Nesse sentido, optou-se pela condução dos ensaios com o sensor na mesma posição de instalação. Assim, os resultados dos tensiômetros serão apresentados apenas para as profundidades de 14 e 6 cm.

Na Figura 4.7 pôde-se notar um comportamento semelhante das curvas de ψ em relação à θ (Figura 4.6). O tensiômetro posicionado a 14 cm da superfície não foi percebido grandes alterações com o umedecimento, somente um leve decaimento da curva frente ao umedecimento até a camada. Porém, na posição de 6 cm, o tensiômetro foi mais sensível à

saturação, apresentando um decaimento de 10 kPa, sentido a partir de 20 min de ensaio. Portanto, o tensiômetro apresentou um *delay* de 7 min em relação à mudança de comportamento de θ , apresentado na Figura 4.6.

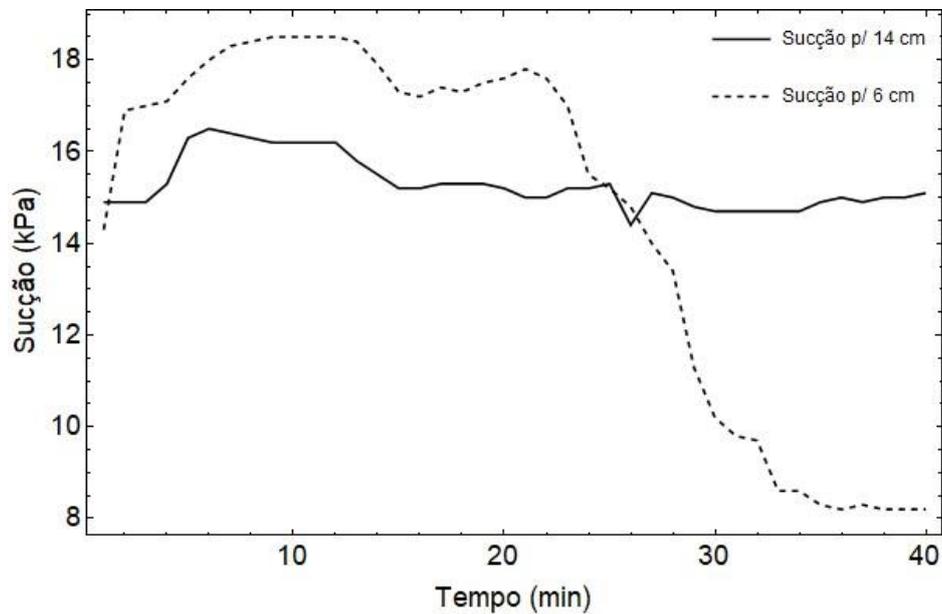


Figura 4.7. Gráfico do 1º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.

Na Figura 4.8-(a-b) estão ilustradas as fotografias do modelo físico no momento inicial e final do ensaio. Assim, pode-se notar que na Figura 4.8-(b), existe uma zona mais escurecida na região do pé do talude, indicando uma maior concentração de umidade do que no início do ensaio, se comparado com a Figura 4.8-(a).

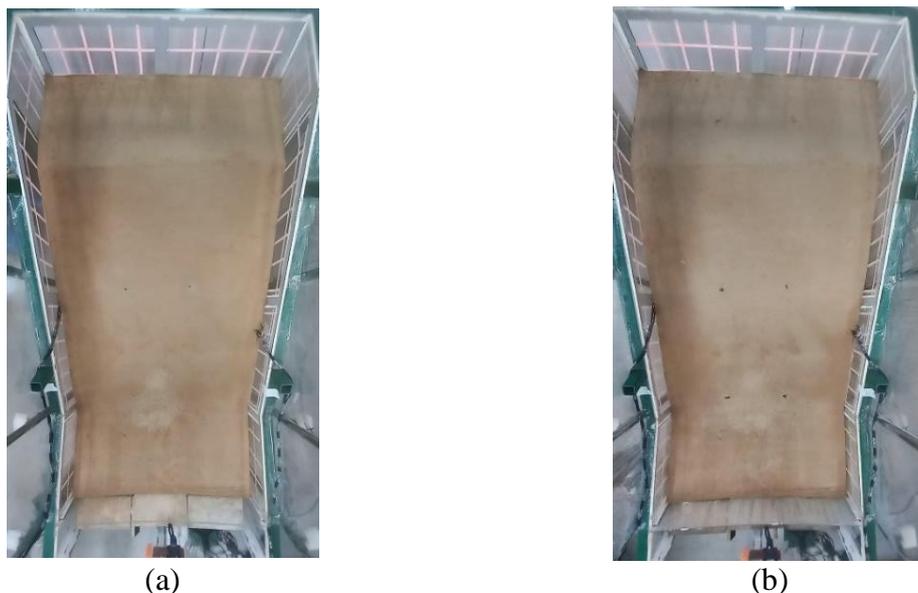


Figura 4.8. Fotografias do modelo físico de talude em pequena escala durante o 1º Ensaio: (a) início do ensaio; e (b) fim do ensaio.

3) Ensaio 02

O 2º ensaio foi conduzido no dia seguinte ao primeiro e teve o objetivo de simular uma chuva máxima constante de 78,2 mm/h por um período de 75 min, em que foi contabilizada uma precipitação acumulada de cerca 100 mm, conforme observa-se na Figura 4.9. Para isto, foram ligados os 06 aspersores com a finalidade de produzir um efeito mais significativo de saturação do que o modelo reduzido de talude havia alcançado no primeiro ensaio.

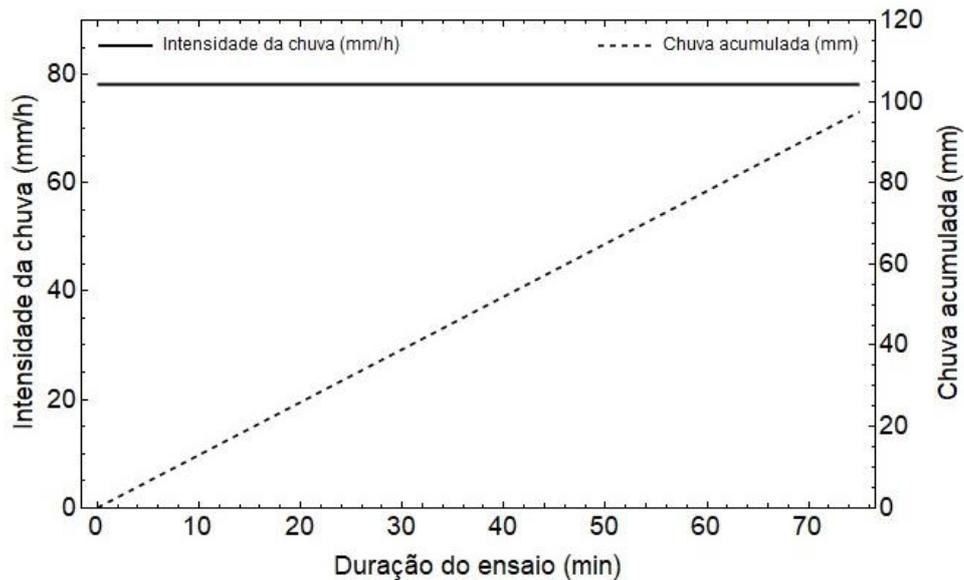


Figura 4.9. Diagrama da intensidade de chuva em mm/h e a chuva acumulada em mm durante o 2º Ensaio.

Na Figura 4.10 estão apresentados os resultados de θ referentes ao DL1 do 2º ensaio. Primeiramente no tempo $t=0$, foram observados comportamentos iniciais divergentes aos medidos ao final dos 40 min do 1º ensaio (Figura 4.4). Este desempenho ilustrou a troca de umidade entre as camadas, mesmo no período entre ensaios, em que o modelo se encontrava em repouso sem aplicação de chuva artificial.

Essa situação confirma o comportamento transiente do modelo físico, em que no caso do sensor posicionado a 22 cm de profundidade houve um aumento de saturação, enquanto que para as regiões mais superficiais, sensores a 14 e 6 cm, observou-se uma perda de umidade para a atmosfera ou para as camadas mais profundas.

Desta forma, a partir da aplicação da precipitação, todas as curvas apresentaram um comportamento crescente, em que os sensores mais superficiais responderam à infiltração mais rapidamente, a partir de 10 min com a aplicação de 13 mm de chuva precipitada até este momento.

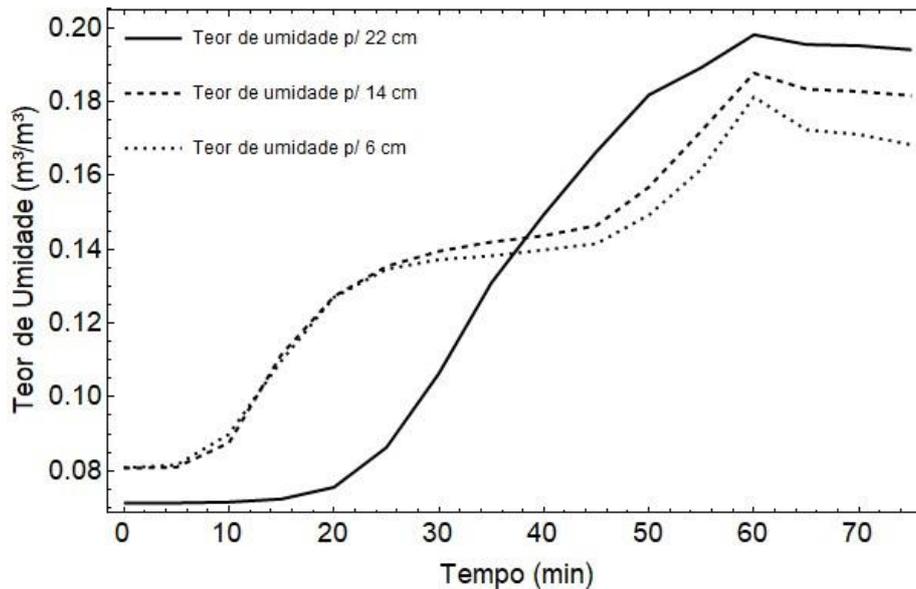


Figura 4.10. Gráfico do 2º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.

Para o sensor a 22 cm abaixo da superfície, a resposta à infiltração foi medida somente a 20 min do início do ensaio, com uma chuva acumulada de 26 mm. Neste caso em específico, com a aplicação de uma chuva constante, a partir do tempo supracitado, a curva cresce continuamente até atingir um θ de 0,2, valor medido que supera os teores de umidade para as profundidades de 14 e 6 cm.

Esta situação adversa sugere que as camadas mais superficiais não conseguem manter a água infiltrada sem escoar para as camadas mais profundas, devido à alta porosidade do solo arenoso. Desta forma, o fluxo de água se dá mais rapidamente para o interior do solo do que a reposição pela precipitação. Assim, é interessante observar que ao final do ensaio os maiores teores de umidade são para as profundidades de 22, 14 e 6 cm, nesta ordem, pois as camadas mais profundas receberam o acumulado do fluxo de água infiltrada das camadas superiores.

Na Figura 4.11 estão apresentados os resultados referentes ao ψ medido para as profundidades de 22, 14 e 6 cm. Portanto, observou-se um comportamento decrescente esperado para todas as curvas, devido ao aumento da umidade. O maior ψ medido foi para a profundidade de 22 cm, que foi da ordem de 10 kPa. Este valor advém do decaimento da sucção entre o ensaio passado, que foi finalizado na ordem de 15 kPa (Figura 4.5) e o atual que, no início do presente ensaio (Figura 4.11), apresentou 5 kPa a menos.

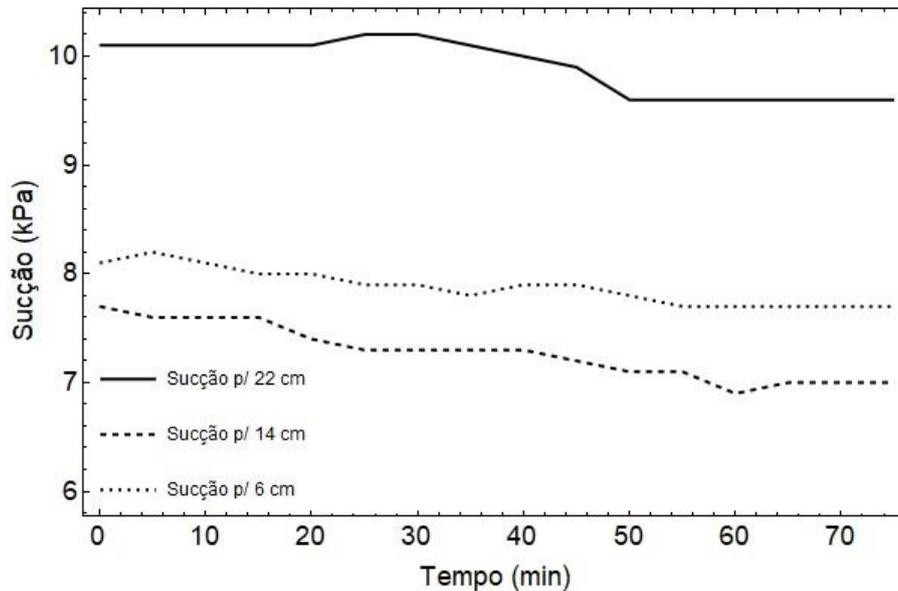


Figura 4.11. Gráfico do 2º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.

Esse decaimento do valor de ψ , entre ensaios, pode ser explicado pelo aumento da umidade na posição de 22 cm em detrimento de outras camadas mais superficiais, evidenciando que existe modificações no estado do solo em períodos pós eventos de chuva, conforme discutido em momento anterior à Figura 4.10.

Quanto às curvas referentes às profundidades de 14 e 6 cm, ambas mantiveram a mesma ordem de grandeza de cerca de 8 kPa do final das medições do 1º ensaio (Figura 4.5) e apresentaram um leve decaimento de ψ , apesar do aumento de θ para quase 0,2, ilustrado na Figura 4.10.

A partir do gráfico apresentado na Figura 4.12 e na Figura 4.13, serão apresentados os resultados de θ e ψ , nesta ordem, referentes ao DL2 do 2º ensaio.

Assim, após a análise da Figura 4.12, nota-se que todas as curvas apresentaram um comportamento crescente, em que os sensores mais superficiais responderam à infiltração mais rapidamente.

A respeito do sensor posicionado em 22 cm, também foi notada a mesma situação discutida na Figura 4.10, referentes ao fluxo de água para as camadas mais profundas, refletindo em valores maiores de θ do que os outros sensores das camadas de 14 e 6 cm. Esta situação corrobora com a hipótese discutida para os valores medidos do DL1, que sugere que as camadas mais superficiais não conseguem manter a água infiltrada sem escoar para as camadas mais profundas, devido à alta porosidade do solo arenoso. Desta maneira, também fica evidente que ao final do ensaio, os maiores teores de umidade são para as profundidades de 22, 14 e 6 cm.

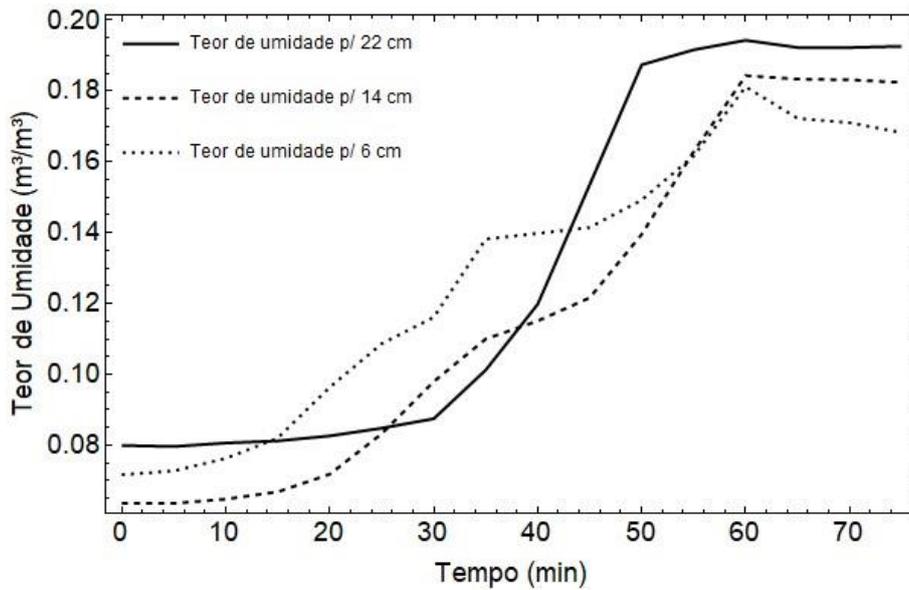


Figura 4.12. Gráfico do 2º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.

A respeito do comportamento inicial de ψ apresentado na Figura 4.13, observou-se que no período entre ensaios, houve um aumento no valor de sucção para a posição de 6 cm, devido à perda de umidade desta camada mais superficial com a atmosfera, fato que não ocorreu para a profundidade de 14 cm, que manteve a umidade e, portanto, o valor de ψ no mesmo patamar.

Ao longo do ensaio, ambas as curvas apresentaram um decaimento do valor de ψ , referente ao aumento da umidade pela infiltração da água de chuva, finalizando o ensaio em valores muito próximos, da ordem de 11 kPa.

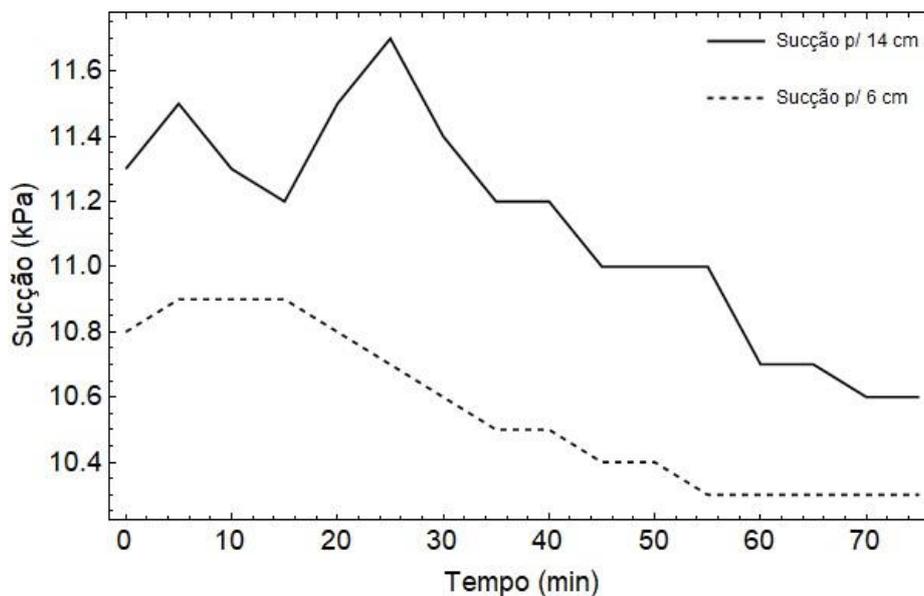


Figura 4.13. Gráfico do 2º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.

Na Figura 4.14-(a-b) estão apresentadas as imagens do modelo físico no início do 2º ensaio e no final. Ao comparar as figuras, nota-se um maior acúmulo de água na região do pé do talude, pois a gravidade favorece a percolação de água para este ponto. Este aumento da umidade também foi detectado pelos sensores de umidade que apresentaram valores maiores de θ .

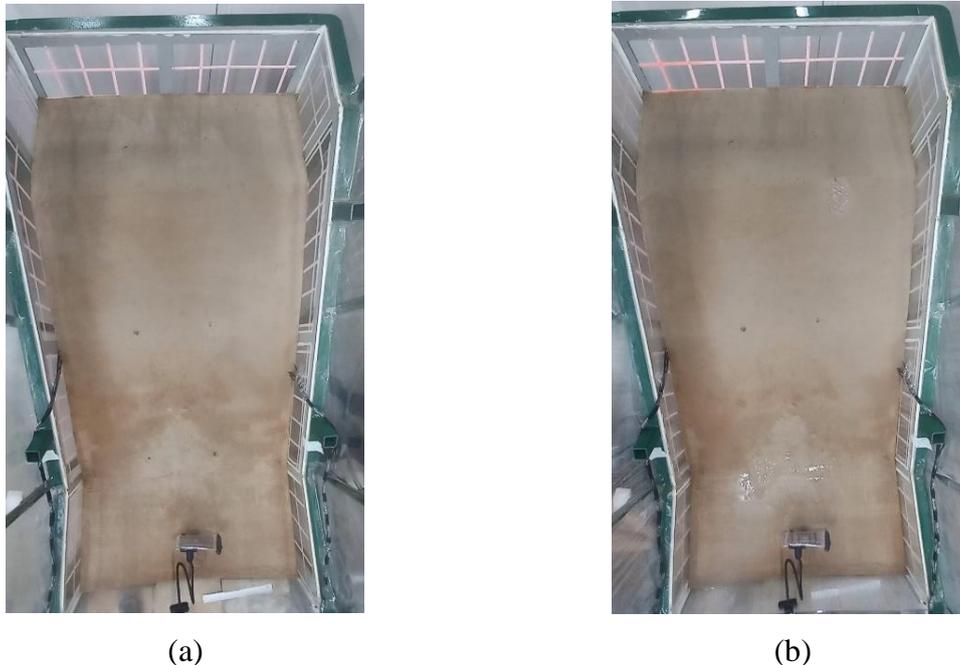


Figura 4.14. Fotografias do modelo físico de talude em pequena escala durante o 2º Ensaio: (a) início do ensaio; e (b) fim do ensaio.

4) Ensaio 03

Nesses três últimos ensaios, é válida a ressalva de que os testes foram realizados no mesmo dia e, ao fim da programação, foi induzida a ruptura do modelo físico. Além disso, o intervalo de repouso entre o 2º e o 3º ensaio foram de 16 dias, para que os efeitos das precipitações antecedentes fossem minimizados, portanto já era esperada uma diminuição nos valores de θ medidos.

No 3º ensaio, o planejamento foi de alternar o funcionamento dos aspersores e verificar os efeitos de uma maior indução de precipitação do lado direito do talude. Neste sentido, o ensaio durou 42 min e foi induzida uma precipitação de 42 mm/h por um período de 20 min e os 22 min restantes não houveram chuva.

Na Figura 4.15 está ilustrada a aplicação de uma intensidade de chuva constante por 20 min e no tempo total de ensaio, a chuva acumulada foi de 14,7 mm.

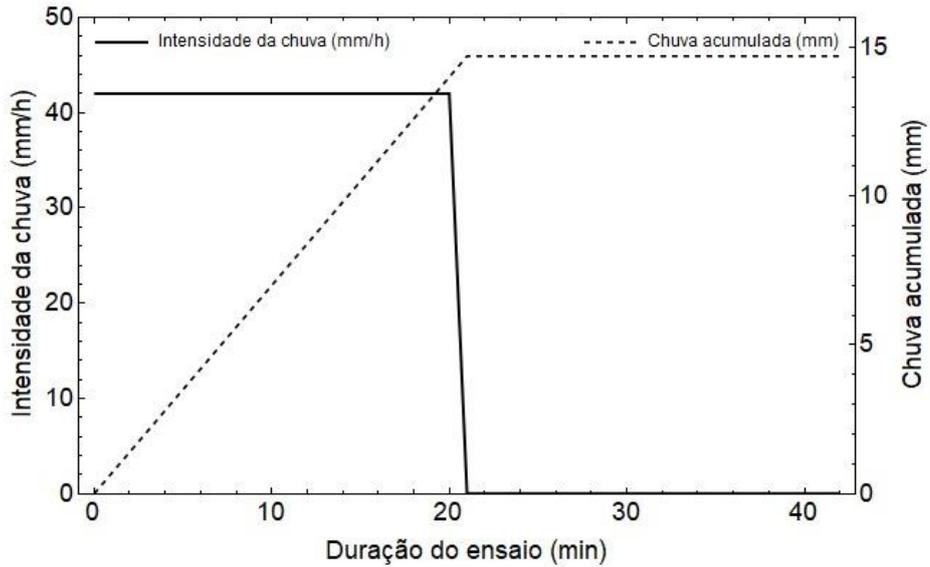


Figura 4.15. Diagrama da intensidade de chuva em mm/h e a chuva acumulada em mm durante o 3º Ensaio.

Na Figura 4.16 estão representados os teores de umidade medidos pelos TEROS 10 posicionados do lado esquerdo do modelo. Como neste ensaio haviam mais aspersores em funcionamento do lado direito, notou-se, portanto, um discreto aumento de θ nas três curvas. É interessante apontar que, os maiores θ seguiram a mesma ordem do final do 2º ensaio, sendo que o teor de umidade na posição de 22 cm foi maior que o 14 cm que foi maior que o de 6 cm.

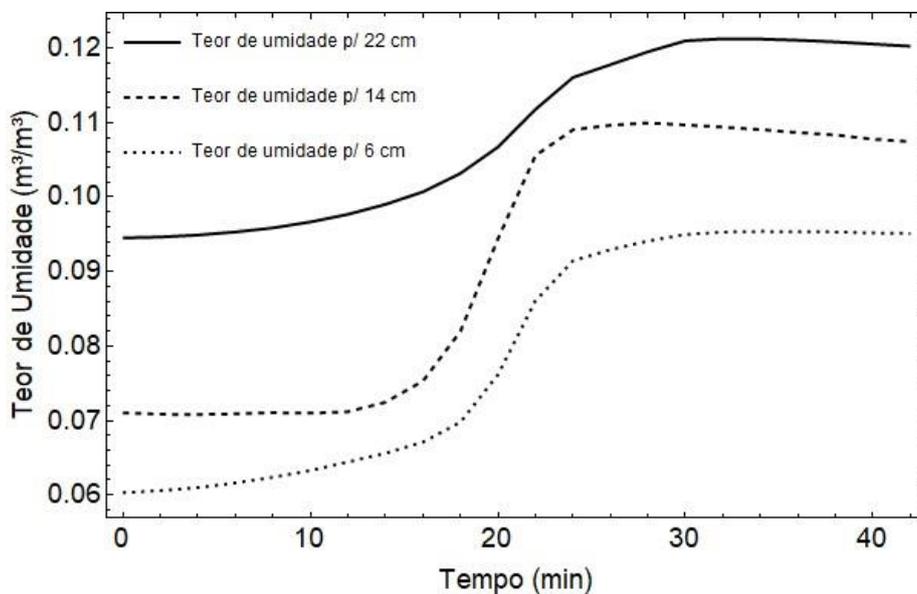


Figura 4.16. Gráfico do 3º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.

Esse cenário evidencia mais uma vez que a taxa de água precipitada sobre esta região foi menor em relação ao que percolou, desta forma, o fluxo de água se deu mais rapidamente

para o interior do solo do que a capacidade de armazenamento de água nas camadas mais superficiais. Assim, os sensores nas regiões mais rasas apresentaram valores menores de umidade do que as mais profundas.

A respeito da sucção medida pelos TEROs 21, os valores estão apresentados na Figura 4.17. Como observado na figura, semelhante às respostas obtidas pelos sensores de umidade, os valores de ψ também não tiveram grandes alterações, que pode ser explicado, em primeiro lugar pelo alcance já de valores mais baixos de sucção e, em segundo, pela menor recepção de água precipitada pelo lado esquerdo do modelo, devido a alternância de funcionamento dos aspersores.

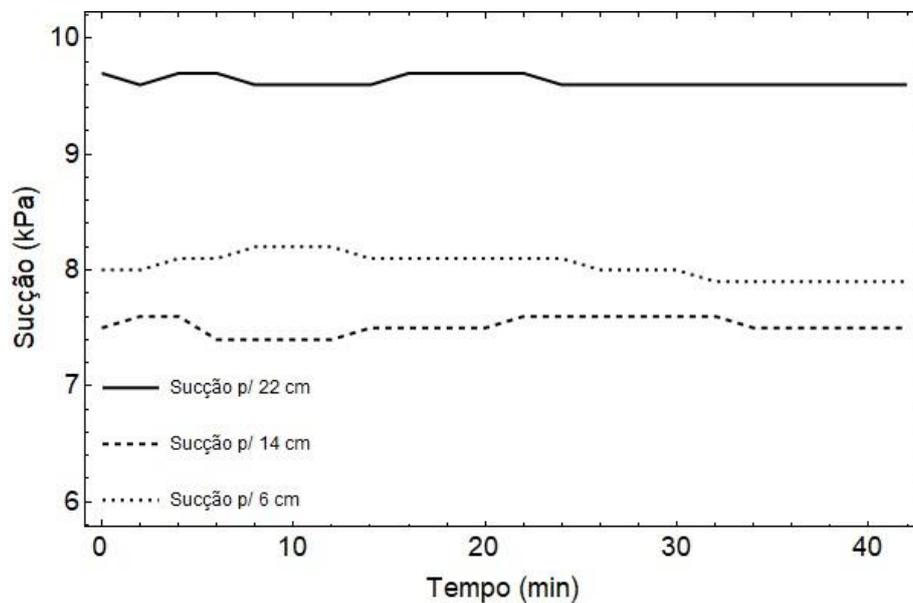


Figura 4.17. Gráfico do 3º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.

Na Figura 4.18 estão apresentados os resultados dos teores de umidade medidos do lado direito do modelo e adquiridos pelo DL2. Nesta região do modelo físico, nota-se que mesmo com a alternância dos aspersores, as respostas hidráulicas dos sensores não corresponderam ao esperado, principalmente nas regiões mais superficiais de 14 e 6 cm, se comparado com os resultados de θ do DL1, ilustrados na Figura 4.16. O aumento mais significativo após os 16 mm de chuva foi de θ medido na posição de 22 cm de profundidade.

Do mesmo modo, como apresentado na Figura 4.18, na Figura 4.19 não foram verificadas grandes alterações nos valores medidos de ψ , referentes às profundidade de 14 e 6 cm. A conclusão primeira deste cenário, é que a intensidade de chuva aplicada pelo tempo de ensaio não foi suficiente para modificar o estado do solo, visto que o mesmo havia perdido umidade nos 16 dias que o modelo esteve em repouso.

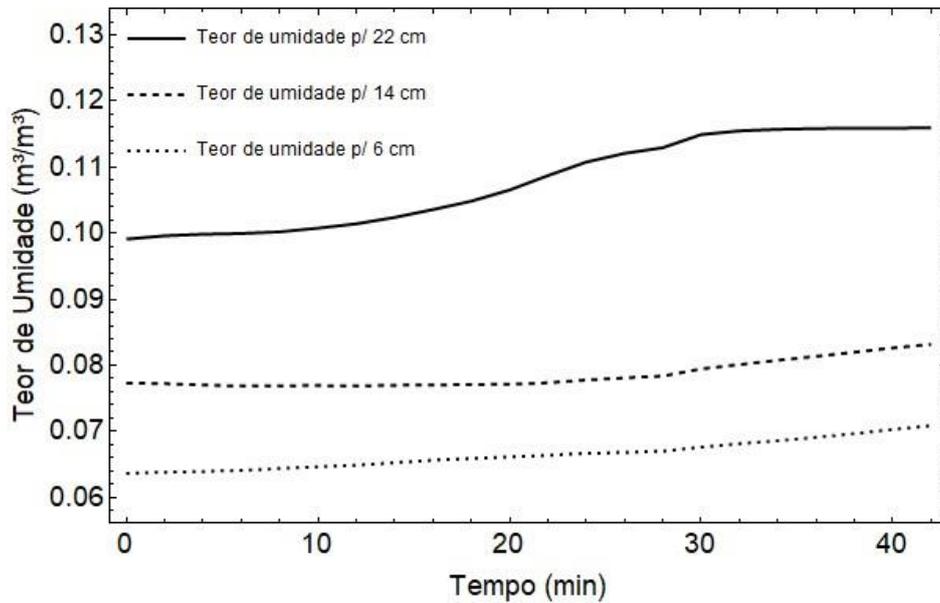


Figura 4.18. Gráfico do 3º ensaio dos resultados de teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.

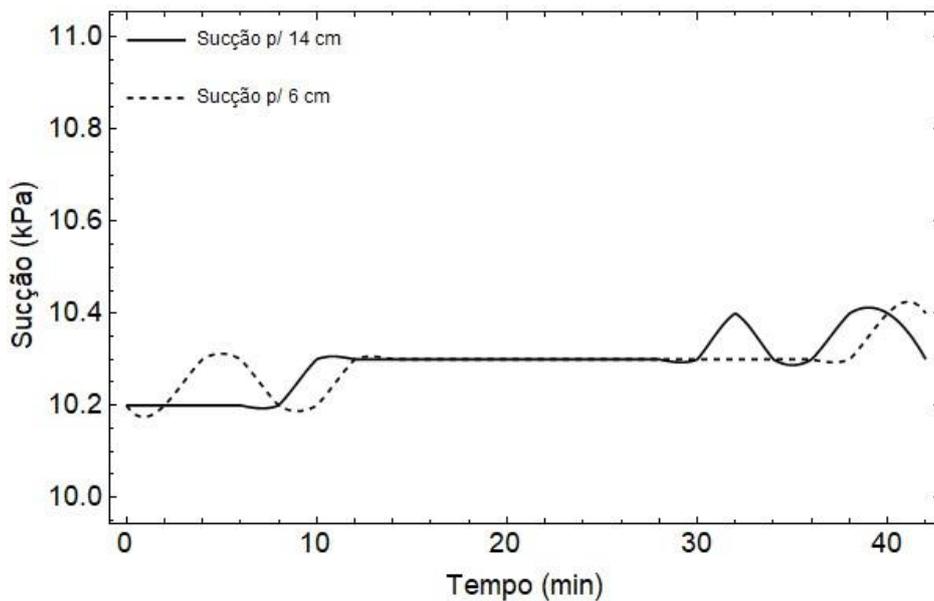


Figura 4.19. Gráfico do 3º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.

Na Figura 4.20-(a-b) estão apresentadas as imagens do modelo físico no início do 3º ensaio ($t=0$ min) e no final ($t=42$ min). Como fora indicado pela instrumentação, tiveram poucas mudanças no estado do modelo físico e, visualmente, também é possível notar que tiveram poucas alterações e variações na cor da superfície do talude que evidenciam regiões de maior umedecimento.

Em resumo, de acordo com as observações dos ensaios até o momento e o acompanhamento da resposta dos sensores, o talude segue estável e sem indícios de ruptura ou sinais de fissuras de tensão.

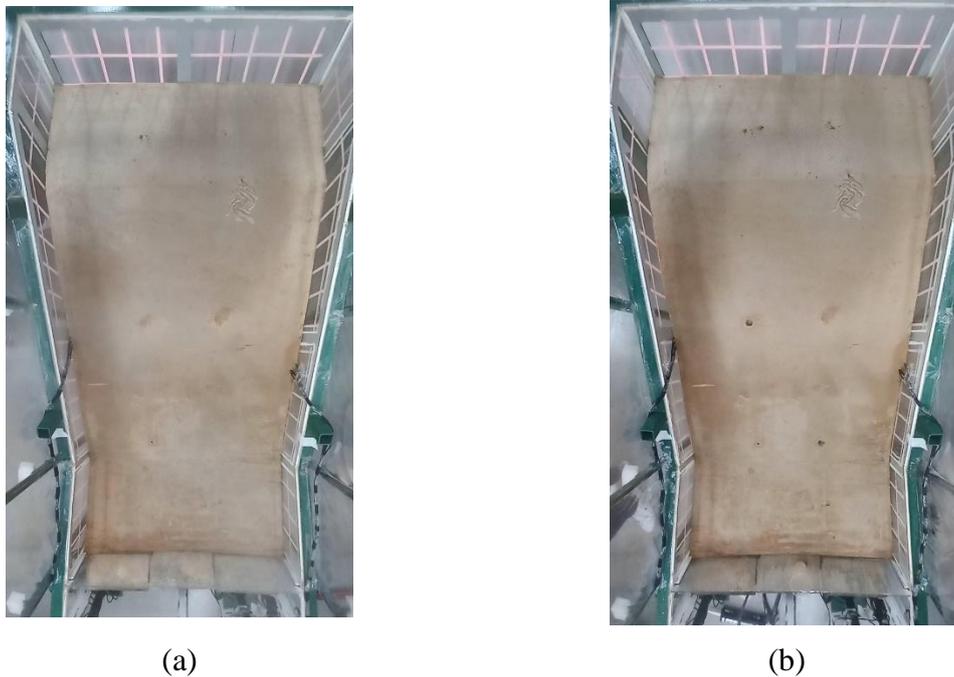


Figura 4.20. Fotografias do modelo físico de talude em pequena escala durante o 3º Ensaio: (a) início do ensaio; e (b) fim do ensaio

5) Ensaio 04

O 4º ensaio começou logo em seguida ao término do 3º e, no presente ensaio, os aspersores foram alternados para que dois dos três aspersores em funcionamento estivessem induzindo uma maior precipitação do lado esquerdo do modelo físico de talude.

A simulação de chuva ocorreu nos primeiros 18 min de ensaio e os últimos 24 min foi desligado o sistema de aspersão, totalizando um período de 42 min de ensaio. A chuva artificial produzida pelo lado esquerdo foi a menor registrada, sendo a intensidade de chuva de 37 mm/h e a acumulada de 11,7 mm. O diagrama de intensidade de chuva e a acumulada pode ser verificada na Figura 4.21.

A respeito dos resultados obtidos de θ adquiridos pelo DL1, podem ser observados na Figura 4.22 o comportamento crescente das três curvas. Contudo, é importante notar que seguindo o comportamento dos ensaios anteriores, o valor medido do teor de umidade para a profundidade de 22 cm segue maior que as demais.

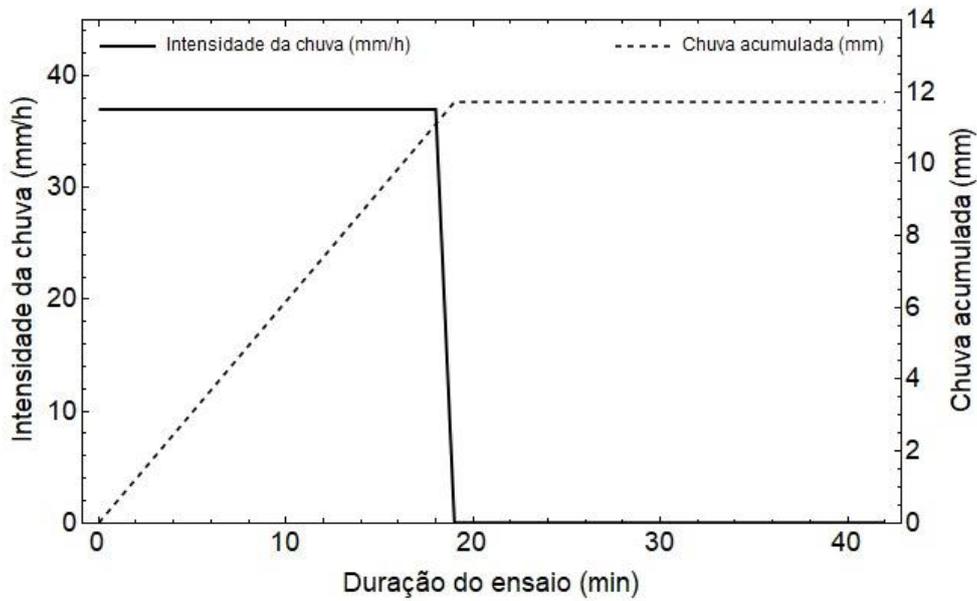


Figura 4.21. Diagrama da intensidade de chuva em mm/h e a chuva acumulada em mm durante o 4º Ensaio.

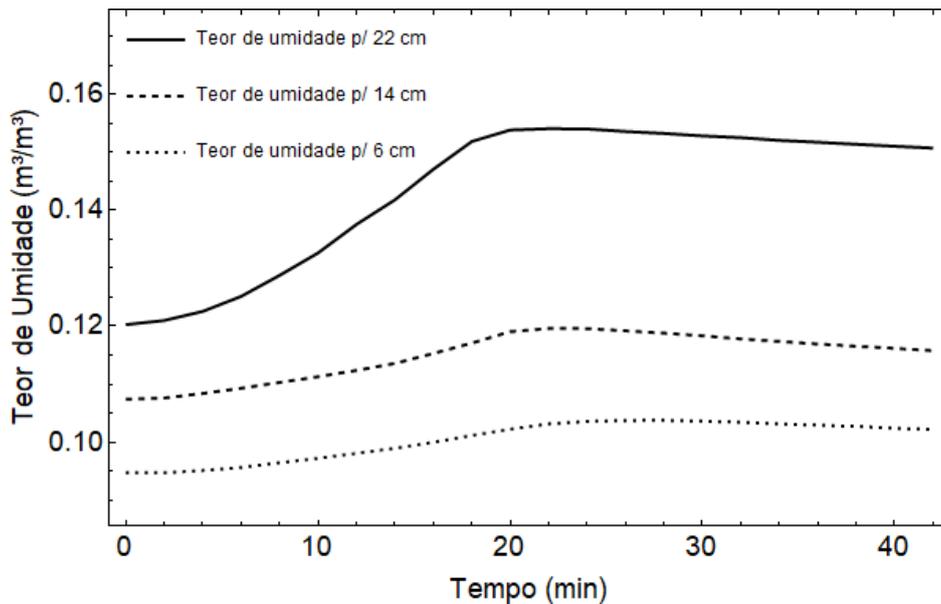


Figura 4.22. Gráfico do 4º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.

Além disto, foi observado um salto de crescimento já a partir dos primeiros 5 min até a estabilização aos 20 min, quando houve o desligamento do sistema. Posteriormente, nota-se que houve um leve decaimento nos valores de θ , demonstrando a capacidade rápida de ganho e perda de umidade do solo granular. Esse comportamento, também foi observado para as curvas de 14 e de 6 cm, porém em menores proporções.

Esse aumento de umidade percebido, foi mais expressivo do que o ganho de umidade registrado no 3º ensaio, portanto, isto demonstra a importância da avaliação do estado de um

talude, considerando o histórico de eventos ocorridos até o ponto de análise. Neste caso em específico, pode-se inferir que a atuação da chuva e umidade antecedentes promoveram a situação descrita.

Relacionado aos valores de sucção, apresentados no gráfico da Figura 4.23, notou-se um leve decaimento nos valores de ψ . Após as análises de todos os ensaios até o momento, infere-se que os tensiômetros de disco cerâmico não conseguem acompanhar em tempo hábil as variações de ganho e perda de umidade, portanto, não foram observadas grandes alterações mesmo com um aumento mais significativo de θ para a profundidade de 22 cm.

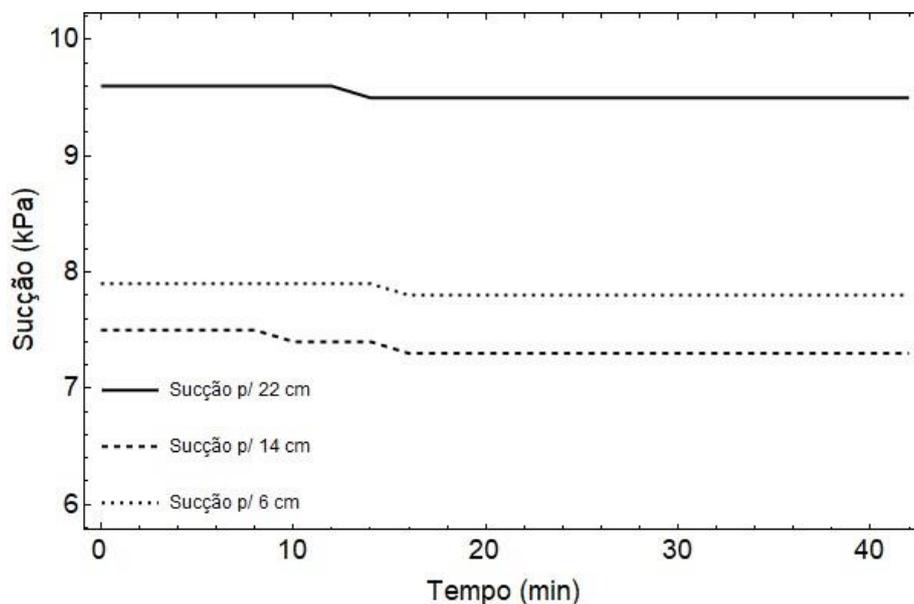


Figura 4.23. Gráfico do 4º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.

Diferentemente dos valores de θ apresentados na Figura 4.22, ao analisar os teores de umidade adquiridos pelo DL2, apresentados na Figura 4.24, observa-se que o maior ganho de umidade foi medido pelo sensor posicionado a 6 cm da superfície. Este aumento de umidade foi mais expressivo após os 10 min de precipitação e perdurou até cerca de 20 min, quando houve o desligamento do sistema de aspersão.

Este comportamento adverso pode ter ocorrido, devido a somente um aspersor estar promovendo uma precipitação sobre o lado direito do talude, desta maneira, uma menor quantidade de água foi aspergida e o fluxo de água infiltrada não foi suficiente para promover um aumento de umidade para as camadas de 14 e 22 cm de profundidade.

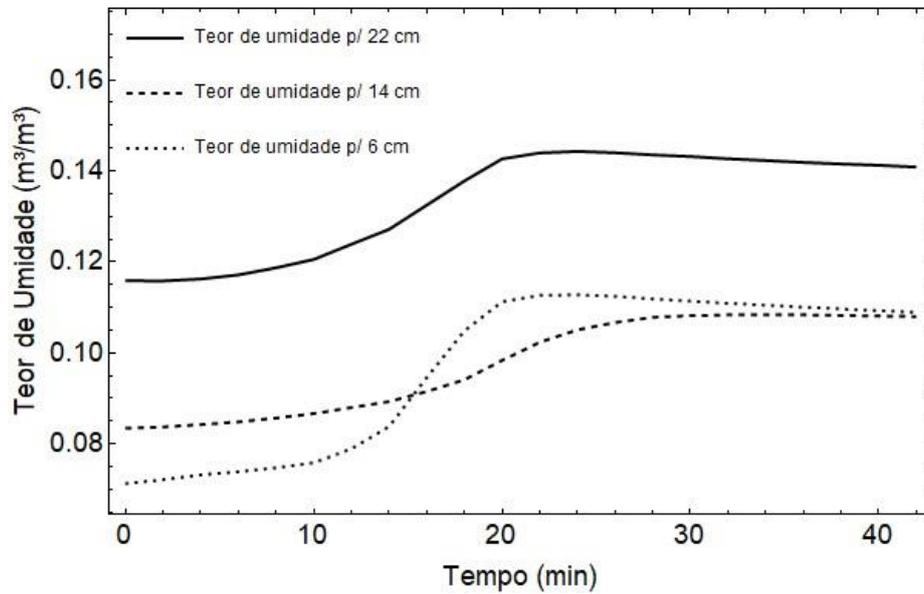


Figura 4.24. Gráfico do 4º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.

Quanto aos valores de sucção apresentados no gráfico da Figura 4.25, observa-se uma oscilação de resultados a partir de 10 min, que coincide com o aumento dos teores de umidade registrados na Figura 4.24. Estas oscilações podem estar relacionadas ao processo de umedecimento do solo, que no período de 10 a 20 min foram observadas modificações nos valores de ψ para ambas as curvas, voltando a normalizar após o desligamento do sistema e continuar constante.

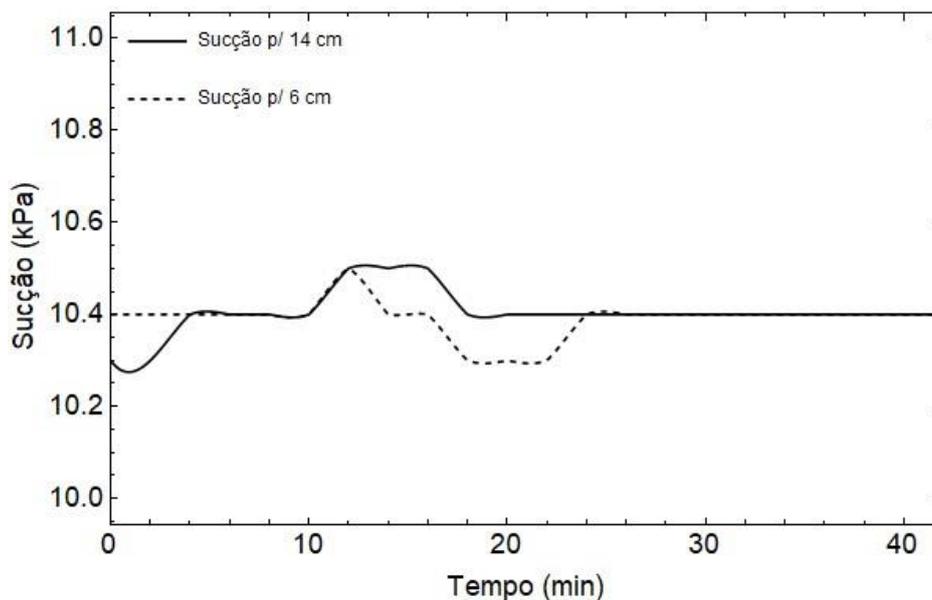


Figura 4.25. Gráfico do 4º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.

De acordo com o Manual do tensiômetro TEROS 21, existe algumas limitações de medição deste sensor para solos mal graduados ou uniformes, que é o caso da presente situação, quando estão na faixa úmida. Esta situação fica mais evidente na Figura 4.17 e Figura 4.23.

O manual do fabricante informa que o potencial de entrada de ar nos maiores poros do disco cerâmico é de cerca de 9 kPa. Contudo, nesta faixa de tensão, o disco cerâmico precisa ter acesso ao ar (secagem do solo) para que os poros maiores do aparelho comecem a drenar e a resposta do sensor altere. Assim, se o solo ao redor do sensor tiver um potencial de entrada de ar inferior a 9 kPa, a cerâmica não começará a perder água até atingir o potencial de entrada de ar do solo. Esta situação explica os casos em que a curva se estabiliza, pois o sensor pode não começar a responder até que os potenciais da água sejam mais altos (10 kPa).

Na Figura 4.26-(a-c) estão representadas as imagens do modelo físico em três momentos durante o 4º ensaio, sendo ilustrada na figura (a) o início do 4º ensaio ($t= 0$ min), na (b) está apresentada o fim do 18º min quando houve o desligamento dos aspersores e na (c) o fim do 4º ensaio ($t= 42$ min).

Como demonstrado na Figura 4.26-(b) foi possível observar a formação de um acúmulo de água na região do pé do talude, principalmente do lado esquerdo, referente aos dois dos três aspersores em funcionamento deste lado em específico. Nota-se que o único aspersor em funcionamento do lado direito não conseguiu produzir o mesmo efeito observado neste lado do modelo.

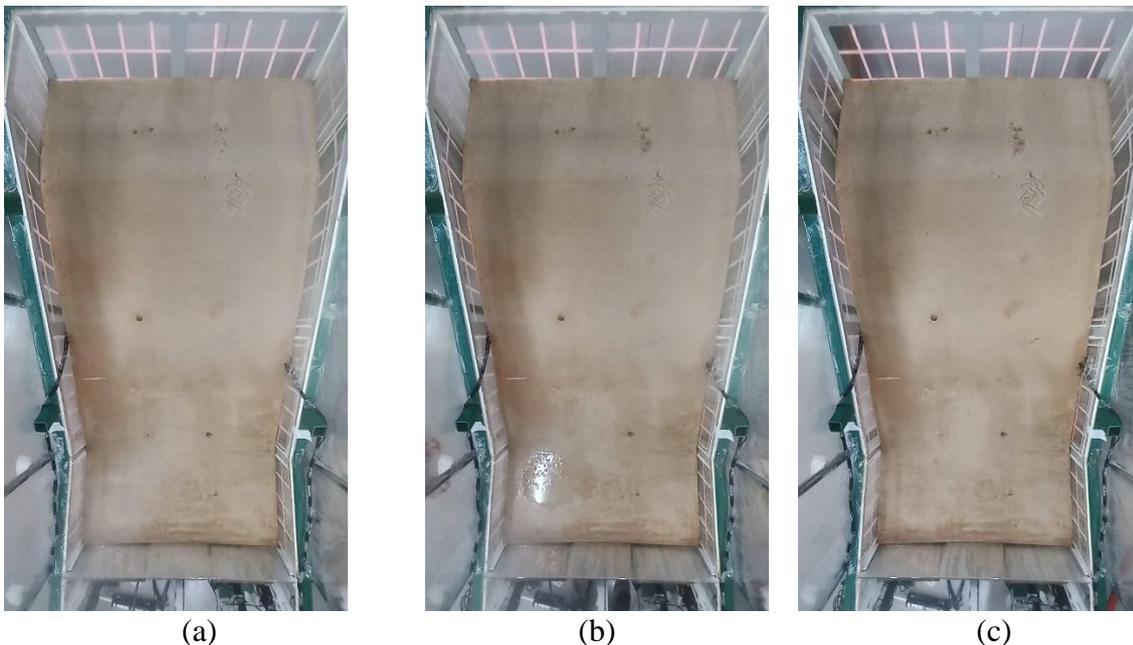


Figura 4.26. Fotografias do modelo físico de talude em pequena escala durante o 1º Ensaio: (a) início do ensaio; (b) momento do desligamento do sistema de aspersores e (c) fim do ensaio.

Além disso, foi percebido que logo após o desligamento dos aspersores este acúmulo de água logo se dissipou e a situação ilustrada na Figura 4.26-(c) se manteve até o fim do ensaio. Portanto, o cenário observado confirma a alta capacidade do solo granular em perder e ganhar umidade em um curto período de tempo.

6) Ensaio 05

O 5º ensaio foi o último realizado e teve o objetivo de levar o modelo físico de talude em pequena escala até a ruptura. Para isto, estiveram em funcionamento todos os aspersores, promovendo uma precipitação constante de intensidade de 78,2 mm/h e um acumulado de 117 mm durante os 90 min de ensaio. O critério de parada do ensaio foi quando o modelo atingisse o colapso total, que se deu no tempo supracitado.

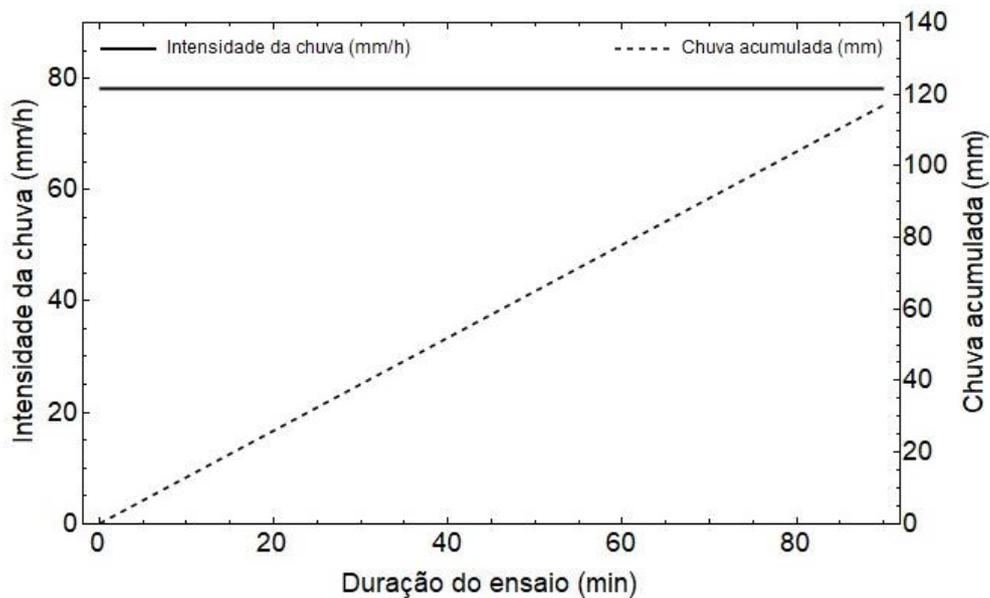


Figura 4.27. Diagrama da intensidade de chuva em mm/h e a chuva acumulada em mm durante o 5º Ensaio.

No início da simulação, o modelo físico ainda não apresentava sinais de instabilidade apesar de o 5º ensaio ter ocorrido no mesmo dia de execução do 3º e do 4º ensaio (Figura 4.32-(a)). Além disto, também foi percebido que logo após o desligamento do sistema de aspersão, nos ensaios anteriores ao 5º, a água acumulada nos macroporos do maciço logo se dissipava, causando uma acomodação das partículas, notada pela mudança de configuração no solo em relação ao formato inicial do modelo. Esta estabilidade relativa pode ter sido alcançada devido à esta dissipação de umidade, condição que foi captada pelos sensores TEROS 10 que

mostraram uma diminuição dos valores do teor de umidade volumétrica medida entre os ensaios.

Na Figura 4.28 estão apresentados os resultados dos teores de umidade adquiridos pelo DL1. As curvas apresentadas, inicialmente, indicam essa perda de umidade discutida no parágrafo anterior, pois apresentam teores de umidade menores do que aqueles apresentados ao fim dos 40 min do 4º ensaio, ilustrados na Figura 4.22.

No período dos primeiros 10 min há um acréscimo expressivo de teor de umidade nas três curvas promovida por uma chuva acumulada de 13 mm. Neste período notou-se que, mesmo em um curto intervalo de tempo já houve um aumento de θ que foi refletido no acúmulo de água no pé do talude, conforme observa-se na Figura 4.32-(b). Este cenário foi ocasionado pela chuva antecedente, em que a umidade remanescente aumentou a condutividade hidráulica no talude que acabou favorecendo o fluxo de água.

Aos 20 min as três curvas ainda continuavam em um perfil crescente, sendo observado uma maior aproximação nos valores de teor de umidade em relação às três profundidades. Além disso, percebeu-se um aumento do fluxo subsuperficial, que fez com que tivesse um maior acúmulo de água na região inferior do modelo. Esta retenção acabou promovendo um aumento do nível d'água, Figura 4.32-(c), induzindo o aparecimento de pontos de instabilidade entre a região final do declive e o início da base.

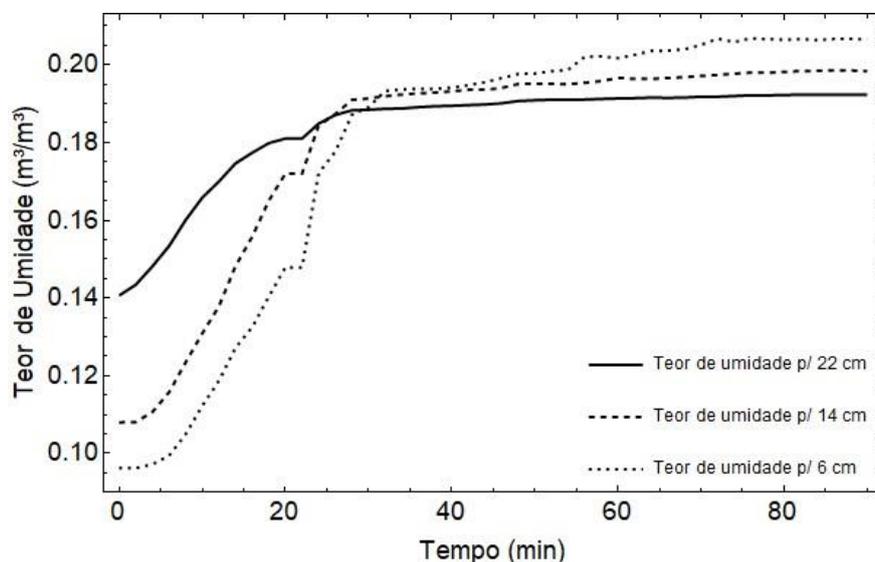


Figura 4.28. Gráfico do 5º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.

Entre 20 e 30 min os pontos de instabilidade ficam mais evidentes e as formações de sulcos e fissuras se acentuaram de minuto a minuto, conforme observa-se na Figura 4.32-(d).

Graficamente, na Figura 4.28, os resultados dos teores de umidade volumétrica medidos continuam visivelmente crescentes até as três curvas se interceptarem ao fim de 30 min em um θ igual a 0,19.

Após os 30 min a curva referente à profundidade de 22 cm seguiu estável até os 90 min finais, enquanto que as curvas para as profundidades de 14 e 6 cm apresentaram um leve crescimento até o final do ensaio, fechando o ensaio com valores de θ igual a 0,20 e 0,21, respectivamente.

Ao observar o comportamento das curvas de θ na Figura 4.28 e o desempenho do talude do início ao fim do ensaio sob à precipitação aplicada, foi percebido que, na medida em que se desenvolvia a progressão do escorregamento do talude, observada após os 20 min de ensaio, ocorreu uma modificação de comportamento de θ observado no gráfico, sendo um primeiro indicativo de falha.

Outro ponto importante que demonstra o processo de progressão do colapso, refere-se à diminuição do crescimento dos valores de θ , em que neste ponto da ruptura, o maciço se abre gradualmente e os grãos que antes formavam uma massa de solo compacta vão sendo levados pela água, proporcionando a formação de erosões superficiais em formatos de sulcos e veios. Estes caminhos preferenciais formados, conduzem a água com mais rapidez na superfície que fez com que diminuísse a infiltração de água nas camadas mais profundas.

Na Figura 4.29 estão apresentados os resultados de sucção adquiridos pelo DL1. Como no gráfico de teor de umidade da Figura 4.28, a sucção também responde ao aumento da umidade, apresentando um leve comportamento decrescente.

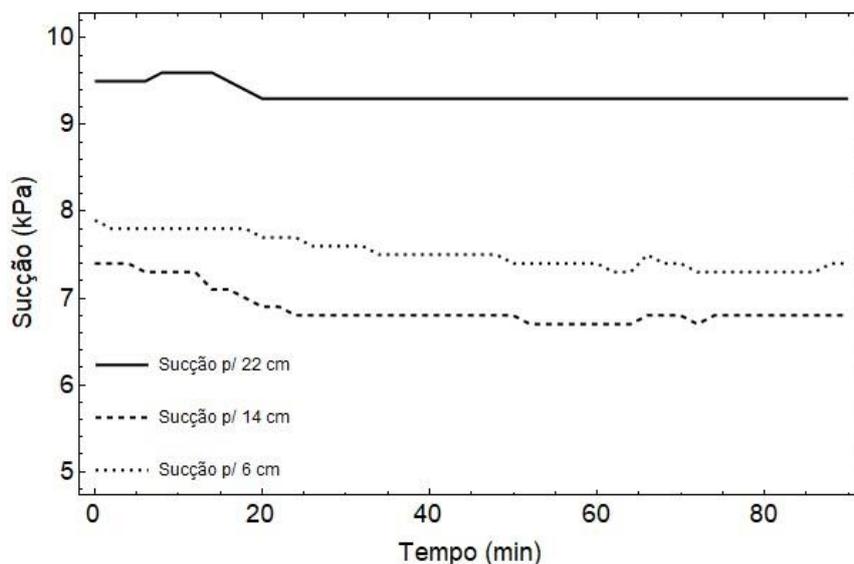


Figura 4.29. Gráfico do 5º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL1 nas profundidades indicadas.

Como o solo já se encontrada umedecido, devido às precipitações anteriores dos ensaios 3 e 4, a dissipação de umidade que ocorreu entre os intervalos não foi suficiente para ocasionar a entrada de ar nos macroporos, para provocar uma mudança de comportamento mais efetiva nas medições dos tensiômetros.

Por outro lado, mesmo havendo um brando decaimento das curvas, todas as três foram sensíveis às mudanças de comportamento do modelo físico, sendo o tensiômetro posicionado em 6 cm, aquele que teve a maior queda, finalizando o ensaio com o valor de ψ menor que 7 kPa.

Em relação aos dados adquiridos pelo DL2, o gráfico do teor de umidade está ilustrado na Figura 4.30. Nesta figura, observa-se que o comportamento de θ para as três curvas foi semelhante aos dados coletados pelo DL1 (Figura 4.28), fato que confirma a confiabilidade dos dados adquiridos pelos sensores em ambas as faixas de monitoramento (direito e esquerdo).

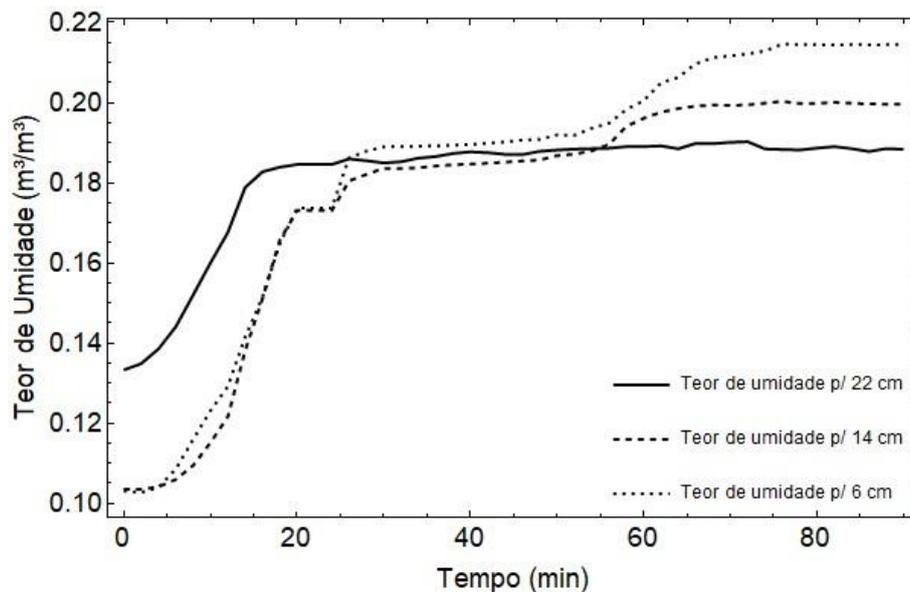


Figura 4.30. Gráfico do 5º ensaio dos resultados do teor de umidade volumétrica adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.

Assim, nota-se que a maior parte do crescimento das curvas se deu nos primeiros 20 min de chuva, que coincidiu com o aparecimento das primeiras evidências de instabilidade. Entre 20 e 30 min, as três curvas se interceptam em um valor de θ igual a 0,18 e seguem constantes até um pouco mais de 50 min, período em que a ruptura do talude já se encontra avançada Figura 4.32-(f). Após o ponto de interseção das curvas, o sensor posicionado a 6 cm de profundidade segue com um valor de θ maior, seguido pelo sensor em 14 e 22 cm, nesta sequência.

Nesta representação gráfica da Figura 4.30, o indicativo de falha também pode ser apontado como a mudança de comportamento das três curvas de um estágio crescente para um patamar constante, onde todo o processo de progressão da falha é dada a partir dos 20 min de ensaio, como observado na Figura 4.32-(c - j).

Na Figura 4.31 estão ilustrados os valores de sucção adquiridos pelo DL2. Aqui observa-se mudanças de comportamento em períodos similares ao que foi apresentado na Figura 4.30.

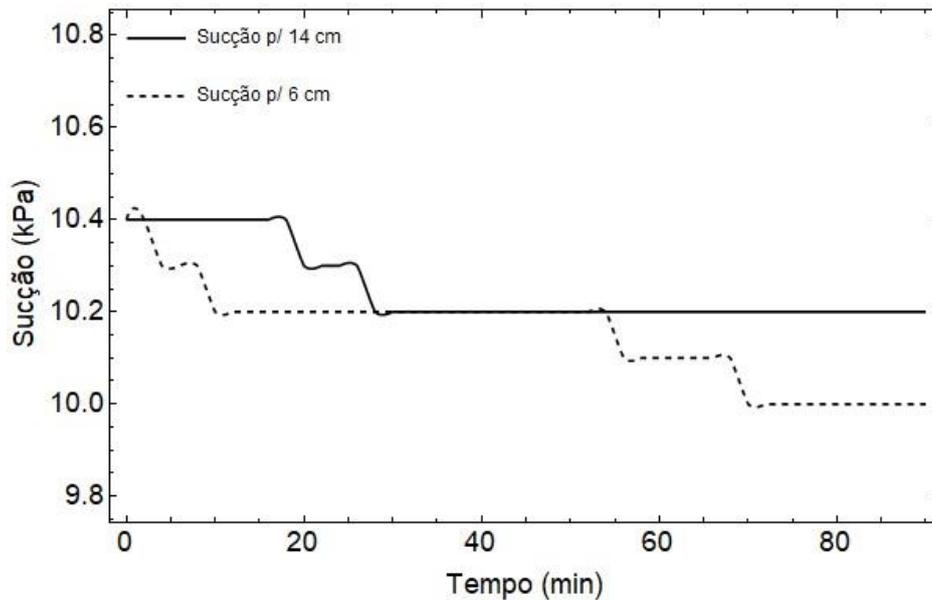


Figura 4.31. Gráfico do 5º ensaio dos resultados de sucção adquiridos pelo DL2 nas profundidades indicadas.

Dessa forma, observa-se que o primeiro período de decréscimo das curvas se deu até cerca de 30 min, período próximo à observação do início do processo de instabilização. Posterior a este momento, ambas as curvas se interceptaram, apresentando um valor de ψ igual a 10,2 kPa, mantendo este valor constante até o intervalo entre 50 e 60 min, em que a resposta do tensiômetro posicionado a 14 cm da superfície manteve-se estável até o fim do ensaio, enquanto que a curva referente ao tensiômetro a 6 cm de profundidade apresentou decréscimos consecutivos de 10,1 até 10 kPa.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 4.32. Fotografias do modelo físico de talude em pequena escala durante o 1º Ensaio: (a) 0 min de ensaio (início do ensaio); (b) após 10 min de ensaio; (c) após 20 min de ensaio; (d) após 30 min de ensaio; (e) após 40 min de ensaio; (f) após 50 min de ensaio; (g) após 60 min de ensaio; (h) após 70 min de ensaio; (i) após 80 min de ensaio e; (j) após 90 min de ensaio (fim do ensaio).

4.2 Padrões de comportamento a partir dos resultados experimentais

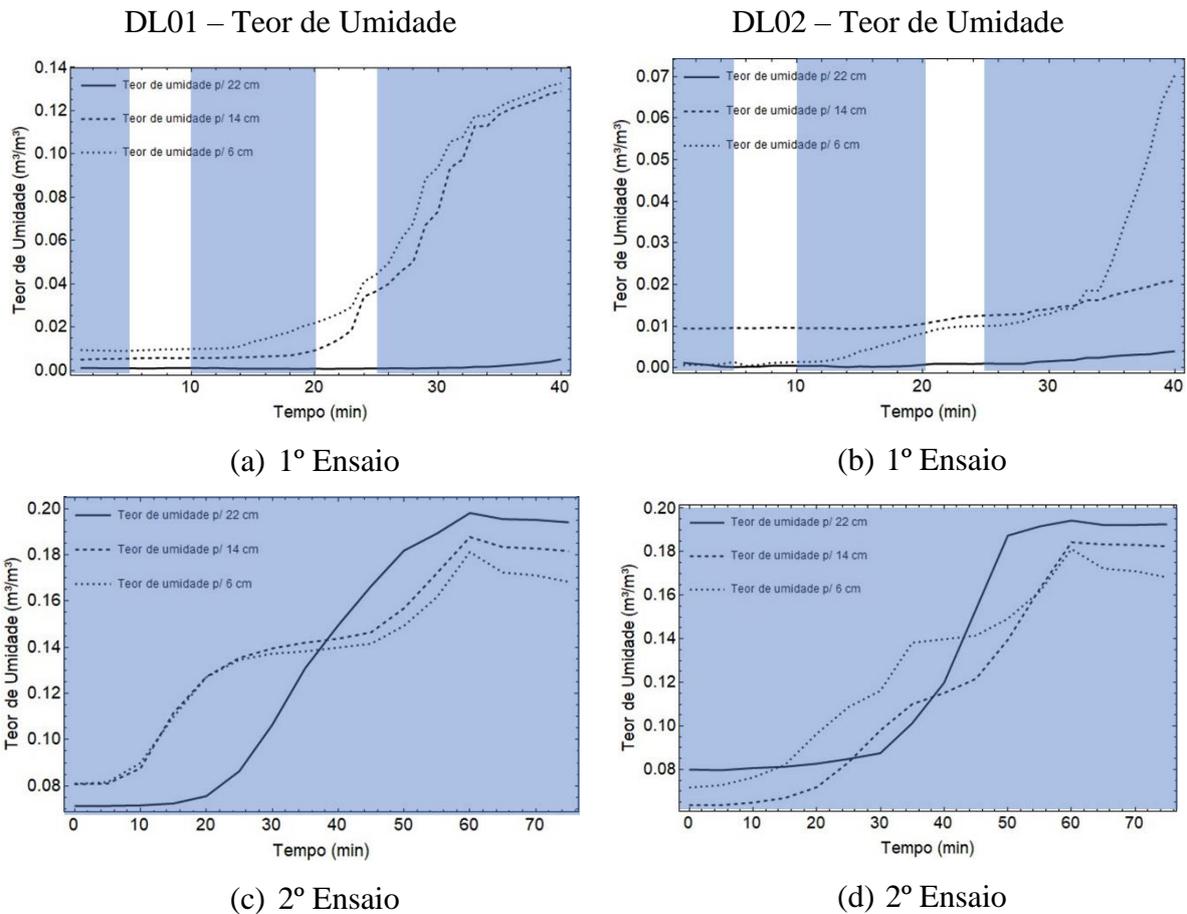
A montagem de um modelo físico de talude juntamente com a execução de um programa experimental, proporcionou algumas observações singulares a respeito dos efeitos causados pela simulação de uma chuva artificial. Portanto, neste tópico serão discutidas as principais considerações obtidas por meio da realização dos 05 ensaios.

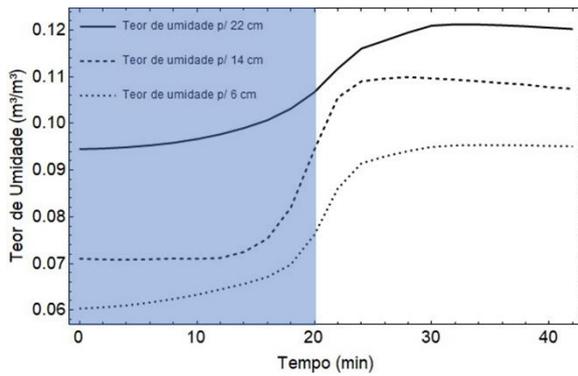
Dessa forma, foi possível formular alguns princípios básicos de estudo do fenômeno de infiltração e os padrões de comportamento observados, especificamente, em um modelo físico de talude em pequena escala a 1g, a partir da simulação de uma chuva artificial.

- I. Primeiramente, pode-se afirmar que não é possível analisar o processo de infiltração e seus efeitos a partir de um período de tempo pontual. O programa experimental mostrou que os eventos ocorrem em cadeia e as respostas hidráulicas estiveram fortemente influenciadas pelo histórico de umidade armazenado no maciço de solo.
- II. O comportamento físico e hidráulico do modelo de talude é transiente. Nos 47 dias de monitoramento ininterruptos, as respostas dos sensores mostraram que o comportamento do solo é dinâmico e independe se houve ou não eventos de precipitação. Portanto, em todo momento haverá mudanças de leitura dos sensores e, visualmente, mudanças na conformação e na coloração da superfície

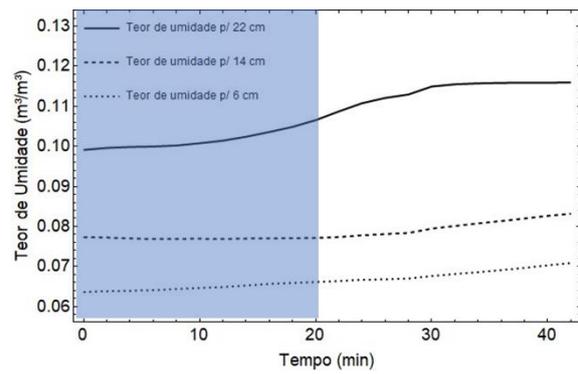
do solo, conforme as variações de umidade que podem ser observadas na Figura 4.33.

- III. O solo granular é relativamente estável se mantida uma coesão aparente mínima. Determinado pelo ensaio de cisalhamento direto, foi encontrada uma coesão aparente, de 10,83 kPa, determinada para um percentual de 10% de umidade inicial. O talude apresentou um bom desempenho durante a realização dos ensaios, resistindo ao ganho de umidade promovido pela infiltração até alcançar um θ de 0,2, que só foi desestabilizado pelo acúmulo de água no pé do talude, devido à elevação do NA, de acordo com Figura 4.34-(a).
- IV. O solo granular utilizado possui uma alta capacidade de dissipação de umidade em um curto intervalo de tempo, promovida pela alta permeabilidade. O modelo físico mostrou que após o desligamento do sistema de aspersão ou o aumento do bombeamento de água remanescente na calha do equipamento Figura 4.34-(b), os valores de θ tenderam rapidamente à estabilização ou à queda na umidade.

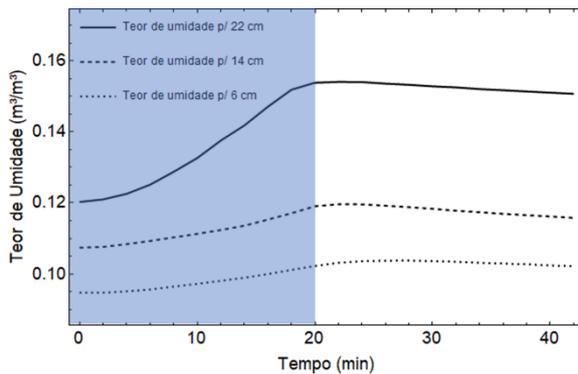




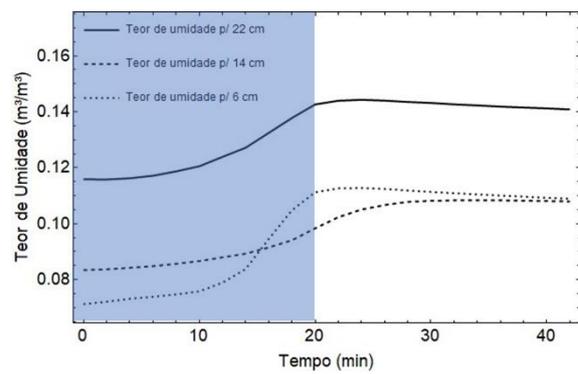
(e) 3º Ensaio



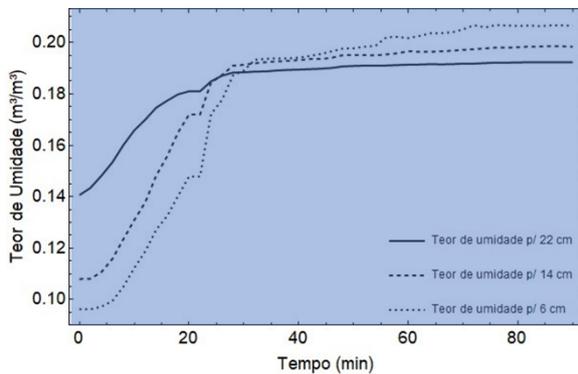
(f) 3º Ensaio



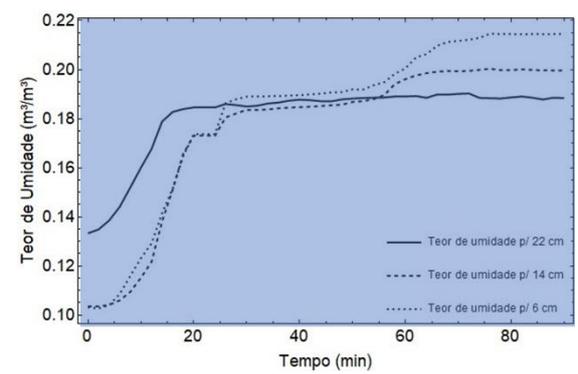
(g) 4º Ensaio



(h) 4º Ensaio



(i) 5º Ensaio



(j) 5º Ensaio

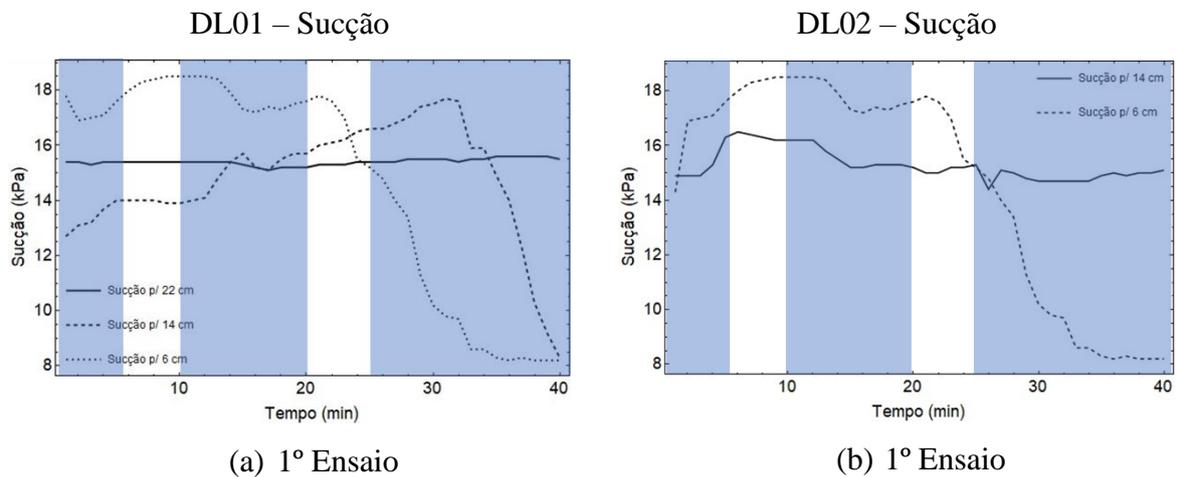
Figura 4.33. Comparação dos resultados dos teores de umidade obtidos dos 05 ensaios, com a indicação dos intervalos de chuva indicados pela cor azul.

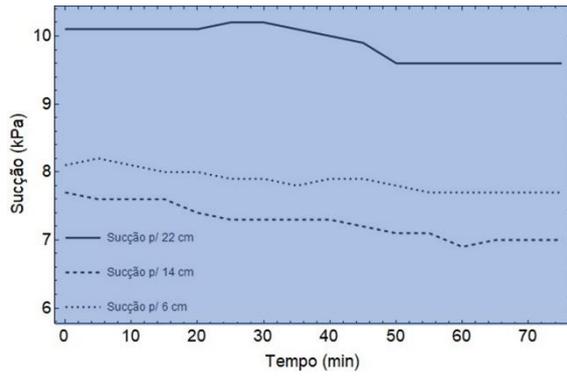
- V. A alta dissipação de umidade e a baixa capacidade de manter os vazios nos macroporos preenchidos por água, promoveu uma relativa estabilidade que foi percebida pela observação da acomodação das partículas, notada pela mudança de configuração no solo em relação ao formato inicial do modelo.



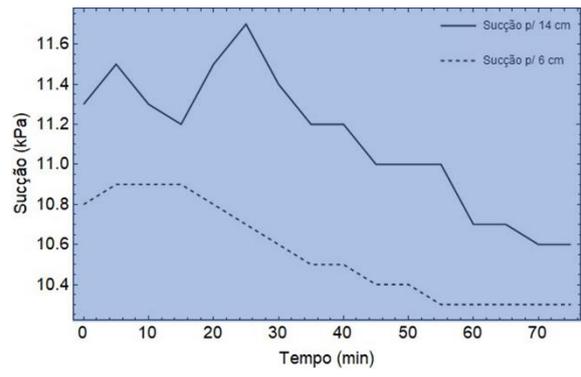
Figura 4.34. Acúmulo de água no equipamento experimental: (a) pé do talude e (b) calha.

- VI. O parâmetro de sucção medido pelo sensor TEROS 21 não foi sensível às variações dos teores de umidade quando medido $\psi < 10\text{kPa}$. A comparação entre os valores de sucção, indicando os períodos de simulação da precipitação pode ser visualizada na Figura 4.35.
- VII. As rápidas alterações no estado do solo granular do modelo físico influenciaram nas medições do tensiômetro TEROS 21, que apresentaram um certo *delay* para a mudança na resposta do sensor se comparado com o de umidade (TEROS 10). Como as medições são realizadas após o equilíbrio do disco cerâmico com o solo do talude, as medições dos sensores apresentaram um atraso de até 10 min.

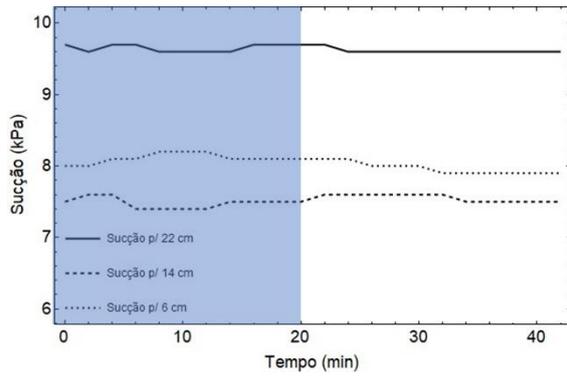




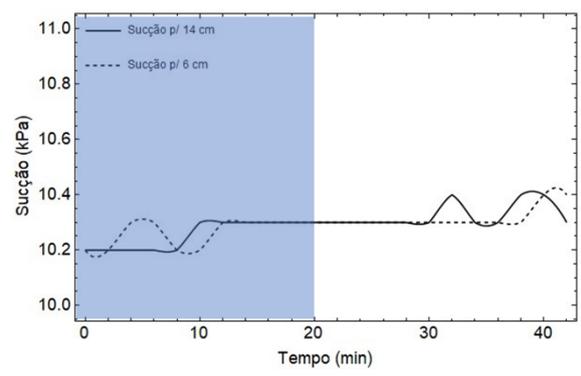
(c) 2º Ensaio



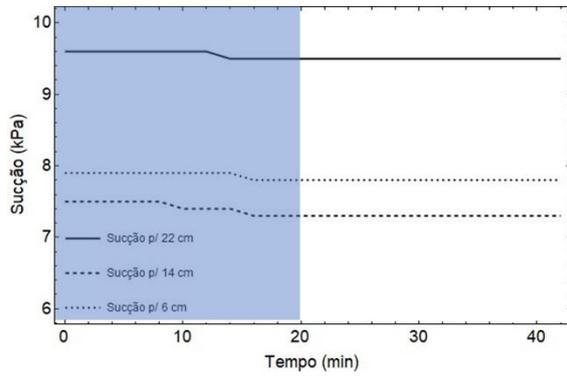
(d) 2º Ensaio



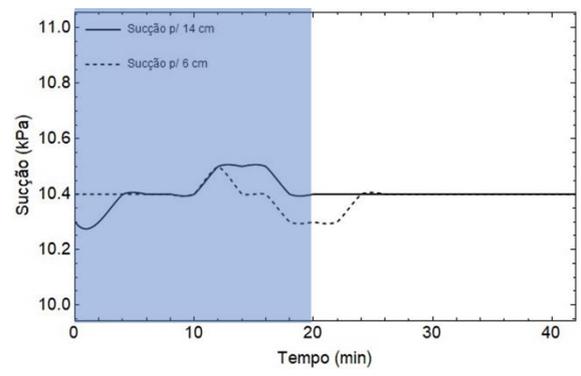
(e) 3º Ensaio



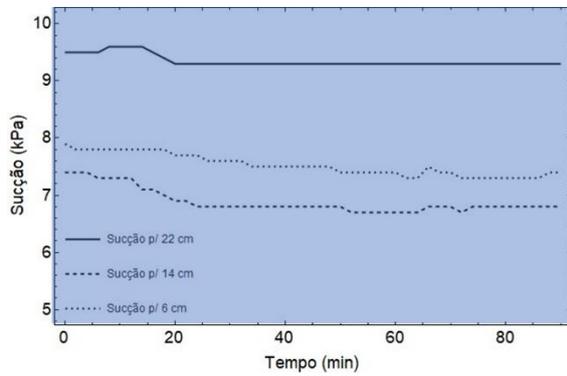
(f) 3º Ensaio



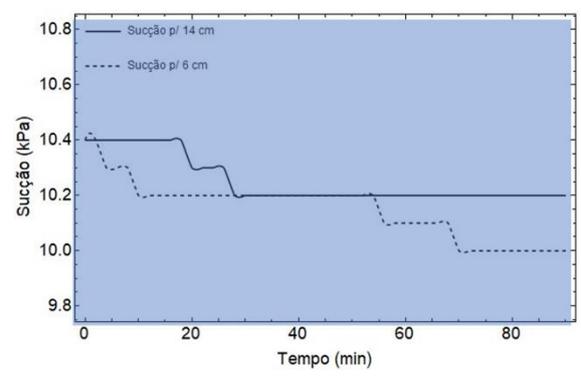
(g) 4º Ensaio



(h) 4º Ensaio



(i) 5º Ensaio



(j) 5º Ensaio

Figura 4.35. Comparação dos resultados dos teores de umidade obtidos dos 05 ensaios, com a indicação dos intervalos de chuva indicados pela cor azul.

- VIII. A partir de um ponto de vista geométrico, o equipamento experimental foi planejado em formato de rampa para induzir a ocorrência da ruptura de modo translacional ou paralelo à superfície do declive do equipamento experimental.
- IX. A ruptura gradativa do modelo físico se desenvolveu sob uma distribuição não circular retrogressiva, da base até o topo. Esse tipo de ruptura foi induzido pela elevação do NA e do processo de infiltração sobre o talude que promoveram o aparecimento de trincas na base e pequenos pontos de fratura no encontro entre base e declive. O desenvolvimento do movimento pode ser observado na Figura 4.36- (a-f).
- X. O indicativo para a ocorrência de um processo de ruptura não está diretamente ligado à saturação completa do modelo ou teores de umidade próximos à saturação. Para esta conformação do equipamento experimental, que induziu uma falha de distribuição retrogressiva, o processo de instabilidade ocorreu estando o solo em condição não saturada.
- XI. Para esta situação, caso a ruptura quisesse ser evitada, as medidas preventivas deveriam ser efetuadas contra o aparecimento de trincas na base e a elevação do NA acima da superfície do talude.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.36. Ilustração do processo de desenvolvimento da ruptura não circular retrogressiva do modelo físico de talude: (a) início do processo de acúmulo de água no pé do talude; (b) acúmulo de água em maior quantidade na base e início da falha; (c) aumento da ruptura próximo à base; (d) verificação de ruptura não circular retrogressiva; (e) alcance da ruptura na região do topo e; (f) finalização do ensaio com a ruptura no topo do talude.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Considerações finais

Esta Tese de Doutorado consistiu na construção de um *Equipamento Experimental* que possibilitou analisar o desempenho de um modelo físico em 1g de um talude arenoso, sob condição não saturada. Esta análise foi feita a partir da simulação de uma chuva artificial para a verificação do comportamento do solo não saturado, quanto à infiltração de água para a produção de anomalias no maciço que pode levar à indução de deslizamentos superficiais.

Esta tese forneceu cerca de 888 horas de dados registrados em 37 dias de monitoramento, portanto, foram armazenados um conjunto aproximado de 1776 dados, considerando o armazenamento em dois *data loggers* (DL 1 e DL 2). Desta maneira, considerando-se a robustez do *Equipamento Experimental* construído, a eficácia do sistema de monitoramento e a quantidade de dados produzidos em diferentes cenários de análise pode-se afirmar que foram identificados alguns princípios básicos de estudo do fenômeno de infiltração e os padrões de comportamento observados para as situações simuladas.

Portanto, a partir das análises dos resultados podem ser tecidas algumas considerações finais para o fechamento da pesquisa baseados nos comportamentos observados que, independentemente da escala de análise, estas percepções também são válidas para as condições reais.

Neste contexto, revisitando alguns dos tópicos principais desta pesquisa que abordou a relação entre mudanças climáticas e a ocorrência de movimentos de massa, a pesquisa mostrou que o comportamento natural de um talude ou encosta é sensível às variações climáticas. No modelo foram observadas as mudanças de comportamento quanto ao umedecimento e à secagem do solo, demonstrando o desempenho transiente em relação às características físicas e hidráulicas, assim concluiu-se que para análises de processos de instabilidades em taludes, o estudo deve ser efetuado a partir de uma série histórica de eventos para o entendimento do comportamento atual da estrutura.

Além disso, o estudo mostrou a dinamicidade no comportamento do modelo físico, que independente da aplicação das chuvas artificiais, ocorreram alterações nos padrões de umidade, sendo as regiões superficiais mais propícias a perder umidade para o ambiente e nas camadas mais profundas, de manter a umidade, devido à dificuldade de troca com a atmosfera. Esta situação explica o motivo de muitos escorregamentos ocorrerem em momentos posteriores à

eventos chuvosos, comprovando esta capacidade de manutenção de água armazenada nos poros do solo.

Além disso, o solo arenoso utilizado na construção do modelo físico apresentou uma boa capacidade de dissipação de umidade em momentos críticos em que foi percebido o aparecimento de trincas ou o acúmulo de água, principalmente no pé do talude. Nestes casos, foram efetuados o desligamento imediato e o aumento do bombeamento de água retida na calha, promovendo uma estabilização nos teores de umidade e sucção. Com o manejo desta situação manteve-se a coesão do solo granular atuante, que para um percentual de 10% de umidade foi medido uma coesão aparente de 10,83 kPa, que só foi rompida pelo aumento do nível d'água no pé do talude.

Assim, conclui-se que para as dimensões do *Equipamento Experimental* e o tempo gasto para a preparação e a execução de cada ensaio, a trabalhabilidade com o solo arenoso se mostrou eficiente em termos de verificação das respostas físicas e hidráulicas medidas pelos sensores, frente às variações propostas em cada cenário de análise. As respostas dos sensores a estas variações ocorreram mais rapidamente e as mudanças físicas de configuração do talude foram visualmente mais perceptíveis.

Todavia, a utilização dos tensiômetros do tipo TEROS 21 não se mostrou sensível à estas rápidas alterações de comportamento do solo arenoso, principalmente para valores maiores no teor de umidade. O tensiômetro indicou um *delay* para a medição das variações propostas pelo programa experimental, indicando não ser recomendável para a situação simulada nesta tese ou para situações que simulem deslizamentos rápidos de taludes. Como recomendação de solução à esta situação, a sugestão é de utilização de tensiômetros que trabalhem em uma faixa maior de medição ou que possuam outro princípio de funcionamento.

Quanto às questões geométricas e as dimensões do *Equipamento Experimental* semelhante a uma rampa, o estudo mostrou que a geometria construtiva do modelo físico induziu a ruptura para o modo não circular translacional e o escorregamento teve início na região da base do talude, caracterizado como um escorregamento retrogressivo, devido ao acúmulo de água na base e o aumento das fissuras nesta região. Neste sentido, é interessante observar que este trabalho pode ser complementado com uma análise de estabilidade de taludes baseado no método de talude infinito, pela característica de ruptura produzida.

Uma das considerações mais importantes a ser feita a respeito desse trabalho, é que o modelo físico simulado, considerando as condições de contorno impostas e as limitações associadas, não necessitou alcançar o teor de umidade saturado ou a sucção nula para a

ocorrência de zonas de instabilidade que levariam o talude ao rompimento com o modo de falha retrogressivo. Esta consideração é importante para as análises computacionais que, muitas vezes, relacionam o tempo de ocorrência da ruptura ao alcance do teor de umidade ao nível de saturação.

Ademais, esta pesquisa mostrou que não houve a necessidade de um aumento muito expressivo no valor de θ para romper o talude, principalmente para este tipo de solo em específico, que possui uma alta condutividade hidráulica, que reflete em uma maior facilidade para a dissipação de umidade. Portanto, neste caso foi mais importante o acompanhamento do teor de umidade para níveis maiores que $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e as percepções visuais do fissuramento ocorrido na base que indicaram a instabilidade maciço.

Por fim, a partir desta Tese de Doutorado pretendeu-se incentivar o estudo experimental e o desenvolvimento de modelos físicos como uma etapa preliminar ao desenvolvimento de metodologias de modelagem computacional dos fenômenos relacionados à infiltração em solos não saturados e a estabilidade de taludes. Este estudo mostrou que o programa experimental efetuado no *Equipamento Experimental* possibilitou a visualização e a inferência de padrões de comportamento característicos para cada situação simulada, condição que não ocorre em uma modelagem computacional.

Assim, a pretensão desta pesquisa foi de ampliar os estudos relacionados à modelagem física, demonstrando a abrangência e a palpabilidade alcançada a partir da construção desta ferramenta de verificação e, a possibilidade de unir esforços com trabalhos correlatos, que utilizam de simulação matemática a partir de dados experimentais gerados, para o estudo da relação da infiltração no solo para a promoção de instabilidades em taludes e encostas.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Como sugestão para pesquisas futuras relacionadas à modelagem física de taludes com simulação de chuva artificial, pode-se citar:

- I. Sobre o material geotécnico utilizado para a construção do modelo:
 - i. no processo de caracterização do material geotécnico, devido à grande quantidade de solo, recomenda-se retirar as amostras para a execução dos ensaios de laboratório, em porções a cada 50 kg do material total de construção do talude. Isto possibilitará a produção de resultados mais confiáveis quanto a caracterização do solo;

- ii. com a produção de mais de um resultado para os parâmetros utilizados na caracterização do solo, sugere-se que seja realizada uma análise estatística para garantir uma maior representatividade das características do solo.
- II. Sobre os aparelhos utilizados na instrumentação do modelo sugere-se complementar o sistema com a aplicação, caso seja economicamente possível a aquisição de transdutores de poropressão, acelerômetros e de sensores de deslocamento;
- III. Recomenda-se que sejam testadas separadamente a indução de falha pela elevação do NA ou somente pela infiltração, de modo a verificar qual modo produz um prejuízo maior ao modelo;
- IV. Para aumentar a resistência do solo aos processos erosivos causados pela infiltração, é sugerido a implementação de gramíneas no declive ou a utilização de materiais fibrosos como alternativa para o retardo ou a minimização de pontos de instabilidade no talude;
- V. Por fim é sugerido, a partir da geração dos dados apresentados nesta pesquisa, que estas informações sejam utilizadas para correlacionar linhas diferentes de pesquisa: experimental, numérica ou analítica, para a correlação de informações e validações de novas metodologias que possam ser aplicadas para a melhoria de sistemas de análise, previsões, estudos de risco, etc., relacionado a estabilidade de taludes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2017). NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro.
- _____. (2018). NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro.
- _____. (2021). NBR16840: Solo — Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro.
- _____. (2020). NBR 16843: Solo — Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos.
- Al Heib, M., Emeriault, F., & Nghiem, H. L. (2019). On the use of 1g physical models for ground movements and soil-structure interaction problems. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(1), 197-211.
- Altaee, A., & Fellenius, B. H. (1994). Physical modeling in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3), 420-431.
- Angeli, M. G., Pasuto, A., & Silvano, S. (2000). A critical review of landslide monitoring experiences. *Engineering Geology*, 55(3), 133-147.
- ASTM D3080 (2011) Standard Test Methods for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions. ASTM International, West Conshohocken.
- Batali, L., Andreea, C. (2016). Slope stability analysis using the unsaturated stress analysis: Case Study. *Procedia Eng* 143:284–291.
- Bishop A. W. (1959). The principle of effective stress. *Teknisk Ukebla*, V. 106(39), 859-863.
- Bishop AW (1955) The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique* 5(1):7–17. DOI: 10.1680/geot.1955.5.1.7
- Borges, L.P.F., Cavalcante, A.L.B., Ozelim, L.C.S.M. Order Out of Chaos in Soil–Water Retention Curves. *Water* 2022, 14, 2421. <https://doi.org/10.3390/w14152421>
- Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., Justes, E. (2002). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and corn. *Agronomie* 22, 69-93.
- Brooks, R. H., and Corey, A. T. (1964). “Hydraulic properties of porous media.” Hydrology Paper No. 3, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo.
- Brutsaert, W. (1967). “Some methods of calculating unsaturated permeability.” *Trans. ASAE*, 10, 400–404.
- BS 1377: (1990) —Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. British Standards Institute, Milton Keynes.
- Buckingham, E. (1907). Studies on the movement of soil moisture. USDA Bureau of Soils – Bulletin No. 38, 61.

- Burdine, N. T. (1953). "Relative permeability calculations from pore size distribution data." *Trans. AIME*, 198, 71–77.
- Campbell, G. S. (1974). "A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data." *Soil Sci.*, 117(6), 311–314.
- Cavalcante, A. L. B., & Camapum de Carvalho, J. (2017). Probabilidade de Ruptura Transiente de Taludes não Saturados em Bordas de Reservatórios. In. *Erosão em Borda de Reservatório*.
- Cavalcante, A. L. B., & Mascarenhas, P. V. S. (2021). Efficient approach in modeling the shear strength of unsaturated soil using soil water retention curve. *Acta Geotechnica*.
- Cavalcante, A. L. B., & Zornberg, J. G. (2017a). Efficient approach to solving transient unsaturated flow problems. I: Analytical solutions. *International Journal of Geomechanics*, 17(7), 4017013.
- Cavalcante, A. L. B., & Zornberg, J. G. (2017a). Efficient approach to solving transient unsaturated flow problems. I: Analytical solutions. *International Journal of Geomechanics*, 17(7), 4017013.
- Cavalcante, A. L. B., & Zornberg, J. G. (2017b). Efficient approach to solving transient unsaturated flow problems. II: Numerical solutions. *International Journal of Geomechanics*, 17(7), 4017014.
- Chiarle, M. & Geertsema, M., Mortara, G. & Clague, J. J. (2021). Relations between climate change and mass movement: Perspectives from the Canadian Cordillera and the European Alps. *Global and Planetary Change*. 202. 103499. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2021.103499.
- Childs, E. C., and Collis-George, N. (1950). "The permeability of porous materials." *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 201, 392–405.
- Cogan, J., Gratchev, I. A study on the effect of rainfall and slope characteristics on landslide initiation by means of flume tests. *Landslides* 16, 2369–2379 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01261-0>
- Costa, M. B. A., & Cavalcante, A. L. B. (2020). Novel Approach to Determine Soil–Water Retention Surface. *International Journal of Geomechanics*, 20(6), 4020054.
- Costa, M. B. A., & Cavalcante, A. L. B. (2021a). Bimodal Soil-Water Retention Curve and k-Function Model Using Linear Superposition. *International Journal of Geomechanics*.
- Costa, M. B. A., & Cavalcante, A. L. B. (2021b). Closure to "Novel Approach to Determine Soil–Water Retention Surface." *International Journal of Geomechanics*.
- Costa, M.B.A. (2022). Modelos Constitutivos de Superfície de Retenção e de Condutividade Hidráulica para Solos Uni e Bimodais. Tese de Doutorado, Publicação G.DM 173/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 103 p.
- Croney, D., Coleman, J. D., and Black, W. P. M. (1958). Movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance. *Water and Its Conduction in Soils Special Rep. No. 40*, Highway Research Board, Washington, D.C., 226–252.

- Cruden, D.M., 1991, A simple definition of a landslide: Bulletin of the International Association for Engineering Geology, v. 43, p. 27–29, DOI:10.1007/BF02590167.
- Damiano, E., & Olivares, L. (2009). The role of infiltration processes in steep slope stability of pyroclastic granular soils: laboratory and numerical investigation. *Natural hazards*, 52, 329-350.
- Damiano, E.; Greco, R.; Guida, A.; Olivares, L. (2008). Early warning of fast landslides triggering based on instrumented slope data analysis. *International Congress on Environmental Modelling and Software*. 32.
- Dantas, A. P. N. & Cavalcante, A. L. B. (2021). Evaluation of antecedent rainfall effects in the analysis of the probability of transient failure in unsaturated slopes. *MATEC Web Conf.*, 337: 03016. DOI: 10.1051/mateconf/202133703016
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon*. Dalmont, Paris.
- de Sousa Pinto, C. (2016). *Curso básico de Mecânica dos Solos*. Oficina de Textos.
- Dilley, M., Chen, R. S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A. L., Arnold, M. (2005). *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis*. © Washington, DC: World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/7376>. License: CC BY 3.0 IGO.
- Douris J., Kim G., Baddour O., Abrahams J., Lapitan J. M., Shumake-Guillemot J., Green H., Murray V., Bhattacharjee S., Palm E., Sengupta R., Stevens D., & Zommers Z. (2021). *Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate, and Water Extremes (1970–2019)*. World Meteorological Organization.
- Egeli, I., & Pulat, H. F. (2011). Mechanism and modelling of shallow soil slope stability during high intensity and short duration rainfall. *Scientia Iranica*, 18(6), 1179-1187.
- Farrel, D. A., and Larson, W. E. (1972). “Modeling the pore structure of porous media.” *Water Resour. Res.*, 8(3), 699–706.
- Fellenius W. (1936). Calculation of stability of earth dam. In: *Transactions. 2nd congress large dams*, Washington, DC, 1936, vol 4, pp 445–462
- Figuereido de Sousa, P., Mendonça Naime, J., Crestana, S., Cavalcante, A.L.B. (2021). Mathematical Modeling of Water Infiltration in Unsaturated Latosol Samples. In: Barla, M., Di Donna, A., Sterpi, D. (eds) *Challenges and Innovations in Geomechanics. IACMAG 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 125. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64514-4_63
- Fredlund, D. (2006). Unsaturated soil mechanics in engineering practice. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(3): 286–321.
- Fredlund, D. G. & Morgenstern, N.R. (1977). Stress state variables for saturated and unsaturated soils. *Journal of Geotechnical Division*. 103: 447-466.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons. Nova Jersey, EUA, 507 p.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N.R. & Widger, R.A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3):313–321.

- Fredlund, D. G., Xing, A. & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4): 533–546.
- Fredlund, D. G., Xing, A. (1994) Estimation of Soil Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532. DOI: 10.1139/t94-061
- Fredlund, M.D., Fredlund, D. and Wilson, G.W. (2000) An Equation to Represent Grain-Size Distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 817-827. DOI:10.1139/t00-015
- Gardner, W. (1958). “Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils.” Highway Research Board Special Rep. No. 40, Int. Symp. on Physico-Chemical Phenomenon in Soils, Washington, D.C. pp. 78–87.
- Gariano, S. L. & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Sci. Rev.*, 162: 227–252.
- Gitirana Jr., G.F.N., Camapum De Carvalho, J., Ferreira, S.R.M. & Mascarenha, M.M.A. (2012). O comportamento de solos não saturados submetidos à infiltração. Tópicos Sobre Infiltração: Teoria e Prática Aplicadas a Solos Tropicais. J. Camapum de Carvalho, G. F. N. Gitirana Jr. & E. T. Carvalho (eds.), Brasília, DF, Brasil, pp. 157-182.
- Góis, M. S., Matos, M. M. O., Guimarães, N. O., Costa, K. R. C. B, Moreira, G. R, Silva, A. C. N., Cavalcante, A. L. B. (2021). Instrumentation of soil columns for time-lapse monitoring of the phenomenon of capillary rise through spontaneous potential, soil moisture sensor, electrical resistivity, and GPR measurements. *MATEC Web Conf.*, 337 (2021) 01010. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133701010>
- Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1–24.
- Griffiths, D. V., Huang, J., & Fenton, G. A. (2011). Probabilistic infinite slope analysis. *Computers and Geotechnics*, 38(4), 577-584.
- Hakro, M. R., Harahap, I. S. H. (2015). Laboratory experiments on rainfall-induced flowslide from pore pressure and moisture content measurements. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 3:1575-1613.
- Heller, V. (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 293-306.
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *O Manual de Deslizamento—Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos*. Reston, Virginia, US Geological Survey Circular, 1325.
- Horton, R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Am. Geophys. Un.* 14: 446-460.
- Huang, C.-C., Lo, C.-L. (2013). Simulation of Subsurface Flows Associated with Rainfall-Induced Shallow Slope Failures. *J. Geotechnical Engineering*, 8, 101–111.
- Hughes, S.A. (1993). *Advanced series on ocean engineering. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. World Scientific, London.

- IPCC. (2023). Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Janbu N. (1954). Application of composite slip surfaces for stability analysis. *Eur Conf Stabil Earth Slopes* 3:43–49
- Jentzsch, R. (2002). Estudo de modelos reduzidos destinados à predição de parâmetros térmicos ambientais em instalações agrícolas. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa (MG)
- Jia, G. W., Zhan, T. L., Chen, Y. M., & Fredlund, D. G. (2009). Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels. *Engineering Geology*, 106(1-2), 92-103.
- Kane, W. F., & Beck, T. J. (2000). Instrumentation practice for slope monitoring. *Engineering geology practice in Northern California. Association of engineering geologists Sacramento and San Francisco sections.*
- Khan, N., Bhuvana, R., Reddy, A. M. & Kumar, M. P. (2015). A State-of-the-Art Review on Stability Analysis of Slopes Using Fuzzy Logic Approach. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 5(6): 148-151.
- Kirschbaum, D. B., Adler, R., Hong, Y., Hill, S., & Lerner-Lam, A. (2010). A global landslide catalog for hazard applications: Method, results, and limitations. *Natural Hazards*, 52(3), 561–575. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9401-4>.
- Kirschbaum, D., Stanley, T., & Shou, Y. (2015). Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, 249, 45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>
- Kline, S. J. (1986). *Similitude and approximation theory*. Springer Science & Business Media.
- Lade, P. V. (2010). The mechanics of surficial failure in soil slopes. *Eng. Geol.* 114(1): 57-64, DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.04.003
- Laliberte, G. E. (1969). “A mathematical function for describing capillary pressure-desaturation data.” *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 14(2), 131–149.
- Lu, N. & Likos, J. (2004). State of unsaturated soil. *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc, pp 3-46.
- Luíz, G. C., Martins, L. F. R. & Camapum De Carvalho, J. (2012). A influência do clima na infiltrabilidade do solo. *Tópicos sobre Infiltração: Teoria e Prática Aplicadas a Solos Tropicais*. J. Camapum de Carvalho, G. F. N. Gitirana Jr. & E. T. Carvalho (eds.), Brasília, DF, Brasil, pp 49-72.
- Machado, S.L. & Vilar, O.M. (2015). Potenciais da água no solo. *Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico*. J. Camapum de Carvalho, G. F. N. Gitirana Jr., S.L. Machado, M.M.A. Mascarenha & F.C. Silva Filho (eds.), ABMS, São Paulo, SP, pp 79-96.

- Manual TEROS 10. Soil Moisture Sensor. METER Group LatAm Ltda (METER Group AG, München, Germany) Acessado em 18 de março de 2022. Disponível em: http://publications.metergroup.com/Manuals/20788_TEROS10_Manual_Web.pdf.
- Manual TEROS 21. Tensiometer. METER Group LatAm Ltda (METER Group AG, München, Germany). Acessado em 18 de março de 2022. Disponível em: http://library.metergroup.com/Manuals/20854_TEROS21_Gen2_Manual_Web.pdf
- Marr, W. A. (2013). Instrumentation and monitoring of slope stability. In *Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III* (pp. 2224-2245).
- Mascarenhas, P. V. S. (2022). Risco de Ruptura de Encosta Causada por Chuva com Consequência para Oleodutos e Gasodutos na Serra do Mar Implementando a Análise não Saturada, Transiente e Fracionária. Tese de Doutorado, Publicação G.DM-170/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 188 p.
- Mascarenhas, P. V. S., & Cavalcante, A. L. B. (2022). Stochastic Foundation to Solving Transient Unsaturated Flow Problems Using a Fractional Dispersion Term. *International Journal of Geomechanics*, 22(1), 4021262.
- Mascarenhas, P.V.S. (2022). Risco de Ruptura de Encosta Causada por Chuva com Consequência para Oleodutos e Gasodutos na Serra do Mar Implementando a Análise não Saturada, Transiente e Fracionária. Tese de Doutorado, Publicação G.DM-170/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 188 p.
- Matyas, E. L. & Radhakrishna, H.S. (1968). Volume change characteristics of partially saturated soils. *Geotechnique*, 18(4): 432–448.
- Mcbean, G. & Ajibade, I. (2009). Climate change, related hazards and human settlements. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 1. 179-186. DOI: 10.1016/j.cosust.2009.10.006.
- McKee, C., and Bumb, A. (1987). “Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas.” *Proc., 1985 SPE Formation Evaluation Paper SPE 14447*, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Tex., 599–608.
- Mein, R. G., & Larson, C. L. (1973). Modeling Infiltration during a Steady Rain. *Water Resources Research*, 9(2), 384–394.
- Mendes, L.T.G. (2017). Análise Probabilística de Comportamento de Túneis em Rochas. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142 p.
- Morgenstern N. R. U., Price V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique* 15 (1):79–93
- Mualem, Y. (1976). “A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media.” *Water Resour. Res.*, 12(3), 513–522.
- Mualem, Y. (1986). “Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas.” *Methods of soil analysis, Part 1, 2nd Ed.*, A. Klute, ed., American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wis., 799–823.

- Muntohar, A. S., Liao, H-J. (2010). Rainfall infiltration: infinite slope model for landslides triggering by rainstorm. *Nat. Hazards*, 54:967-984.
- Murphy, G. (1950) *Similitude in Engineering*. Ronald Press, New York.
- Murthy, V. N. S. (2002). *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. CRC press.
- Naik, A. P. & Pekkat, S. (2023). Determination of wetting soil water characteristics curve from disk infiltrometer measurements. *E3S Web of Conferences*. 382. 25006. DOI: 10.1051/e3sconf/202338225006.
- Naik, A. P., Pekkat, S. An appraisal on the soil wetting water retention characteristic curve determined from mini disk infiltrometer and sensor measurements. *Acta Geophys.* 71, 961–982 (2022). DOI: 10.1007/s11600-022-00932-2
- Nichel, A. (2011). Diagnóstico, monitoramento e concepção de medidas de estabilização do colúvio do km 23+400 da rodovia RS/115. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre (RS)
- Novak, P. (1984). Scaling factors and scale effects in modelling hydraulic structures. *Symp. Scale effects in modelling hydraulic structures* 0(3),1–5. H. Rouse, ed. Technische Akademie, Esslingen.
- Orense, R. P., Shimoma, S., Maeda, K., Towhata, I. (2004). Instrumented model slope failure due to water seepage. *Journal of Natural Disaster Science*. 26(9): 15-26.
- Ozelim, L.C.S.M.; Borges, L.P. F.; Cavalcante, A.L.B.; Albuquerque, E.A.C.; Diniz, M. S.; Góis, M.S.; Costa, K.R.C.B.d.; Sousa, P.F.; Dantas, A.P.N.; Jorge, R.M.; Moreira, G.R.; Barros, M.L.; Aquino, F.R. (2022). Structural Health Monitoring of Dams Based on Acoustic Monitoring, Deep Neural Networks, Fuzzy Logic and a CUSUM Control Algorithm. *Sensors*, 22, 2482. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22072482>
- Pajalić, S., Peranić J., Maksimović S., Čeh, N., Jagodnik, V., Arbanas, Ž. (2021). Monitoring and data analysis in small scale landslide physical model. *Appl. Sci.* 2021, 11, 5040. DOI: 10.3390/app11115040
- Petley, D.N. (2010). Landslide hazards, in Alcantara-Ayala, I., and Goudie, A. eds., *Geomorphological hazards and disaster prevention*: Cambridge, UK, Cambridge University Press, p. 63–74.
- Petley, D.N. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, v.40; no. 10; p. 927–930, DOI:10.1130/G33217.1.
- Pfister, M., Chanson, H. 2012. Discussion to “Scale effects in physical hydraulic engineering models”. *Journal of Hydraulic Research* 50(2), 244-246.
- Philip, J.R. (1957) *The Theory of Infiltration*, 1. The Infiltration Equation and Its Solution. *Soil Science*, 83, 345-357. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-195705000-00002>
- Rahardjo, H., Lim, T.T., Chang, M.F. & Fredlund, D.G. (1995). Shear strength characteristics of a residual soil. *Can. Geotech. J.*, 32: 60–77.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*, 1(5):318–333.

- Rijtema, P. E. (1965). "An analysis of actual evapotranspiration." Agricultural Research Rep. No. 659, Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Schilirò, L., Montrasio, L., Mugnozza, G. S. (2016). Science of the total environment prediction of shallow landslide occurrence: validation of a physically-based approach through a real case study. *Science of the Total Environment*, 569-570:134-144.
- Schnellmann R.; Busslinger M.; Schneider, H.R.; Rahardjo H. (2010). Effect of rising water table in an unsaturated slope. *Eng Geol* 114:71–83.
- Schuster, R. & Wieczorek, G. (2018). Landslide triggers and types. DOI: 10.1201/9780203749197-4.
- Shahin, M. A., & Cheung, E. M. (2011). Stochastic design charts for bearing capacity of strip footings. *Geomechanics & engineering*, 3(2), 153-167.
- Shaikh J., Yamsani S. K., Sekharan, S., Rakesh, R. R. (2019) Performance evaluation of 5TM sensor for real-time monitoring of volumetric water content in landfill cover system. *Adv Civil Eng Mater* 8(1):322-335. <https://doi.org/10.1520/ACEM20180091>.
- Shin, H., Kim, Y., Park, D. (2013). Development of rainfall hazard envelope for unsaturated infinite slope. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(2): 351-356.
- Silva Júnior, A.C. (2015). Abordagem Rítmica Probabilística Aplicada em Análises de Fluxo e Estabilidade. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137 p.
- Silva, A.P.N. (2018). Probabilidade de Ruptura Transiente de Encostas Medida Durante Eventos Significativos de Precipitação. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-299/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100 p.
- Šimůnek, J., & Van Genuchten, M. T. (1996). Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water Resources Research*, 32(9), 2683-2696.
- Šimůnek, J., Wendroth, O., & Van Genuchten, M. (1999). Estimating unsaturated soil hydraulic properties from laboratory tension disc infiltrometer experiments. *Water Resources Research*. 35. 2965-2979. DOI:10.1029/1999WR900179.
- Sousa, P. F. (2019). Determinação das Propriedades Hidráulicas de Solos Não Saturados a partir de Ensaio de Infiltração utilizando Tomografias de Raios Gama. Dissertação de Mestrado, Publicação GDM-329/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 82 p.
- Spencer, E. 1967. A Method of Analysis of Embankments assuming Parallel Inter-slice Forces. *Geotechnique*, Vol 17 (1), pp. 11-26.
- Standard, A.S.T.M. (2011) D2487-11 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Sutherland, L. S., Sheno, R. A., & Lewis, S. M. (1999). Size and scale effects in composites: I. Literature review. *Composites Science and Technology*, 59(2), 209-220.

- Szücs, E. (1980). *Similitude and modelling*. Elsevier.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*, Wiley, New York.
- Tohari, A., Nishigaki, M., Komatsu, M. (2007). Laboratory Rainfall-Induced Slope Failure with Moisture Content Measurement. *133(5): 575-587*
- Uhlemann, S. (2018). *Geoelectrical monitoring of moisture driven processes in natural and engineered slopes*. ETH Zurich.
- Wellstead, P. E. (1980). Scale models in control systems engineering. *Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2(3), 137-155.*
- Whiteley, J., Chambers, J., Uhlemann, S., Wilkinson, P., Kendall, J. (2019). Geophysical Monitoring of Moisture-Induced Landslides: A Review. *Reviews of Geophysics. 57.* DOI: 10.1029/2018RG000603.
- Wind, G. P. (1955). “Field experiment concerning capillary rise of moisture in heavy clay soil.” *Neth. J. Agric. Sci., 3, 60–69.*
- Wood, D. M. (2006). Physical modelling. In: *Prediction and simulation methods in geomechanics: State-of-the-art report on selected topics by TC-34* (pp. 7-11). Japanese Geotechnical Society.
- Wu, L.Z.; Zhou, Y.; Sun, P.; Shi, J.S.; Liu, G.G.; Bai, L.Y. (2017). Laboratory Characterization of Rainfall-Induced Loess Slope Failure. *CATENA, 150, 1–8.* DOI: 10.1016/j.catena.2016.11.002.
- Zanol, O., Silveira, F. G., Pinheiro, R. J. B., & Bressani, L. A. (2000). *Instrumentação e monitoramento de um escorregamento em rocha e solo em Malhada, Santa Cruz do Sul. Salão de Iniciação Científica (12.: 2000: Porto Alegre). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2000.*
- Zhai, Q. & Rahardjo, H. (2013). Quantification of uncertainties in soil-water characteristic curve associated with fitting parameters. *Engineering Geology, 163: 144–152.*
- Zohuri, B. (2015). *Dimensional analysis and self-similarity methods for engineers and scientists*. Springer.