

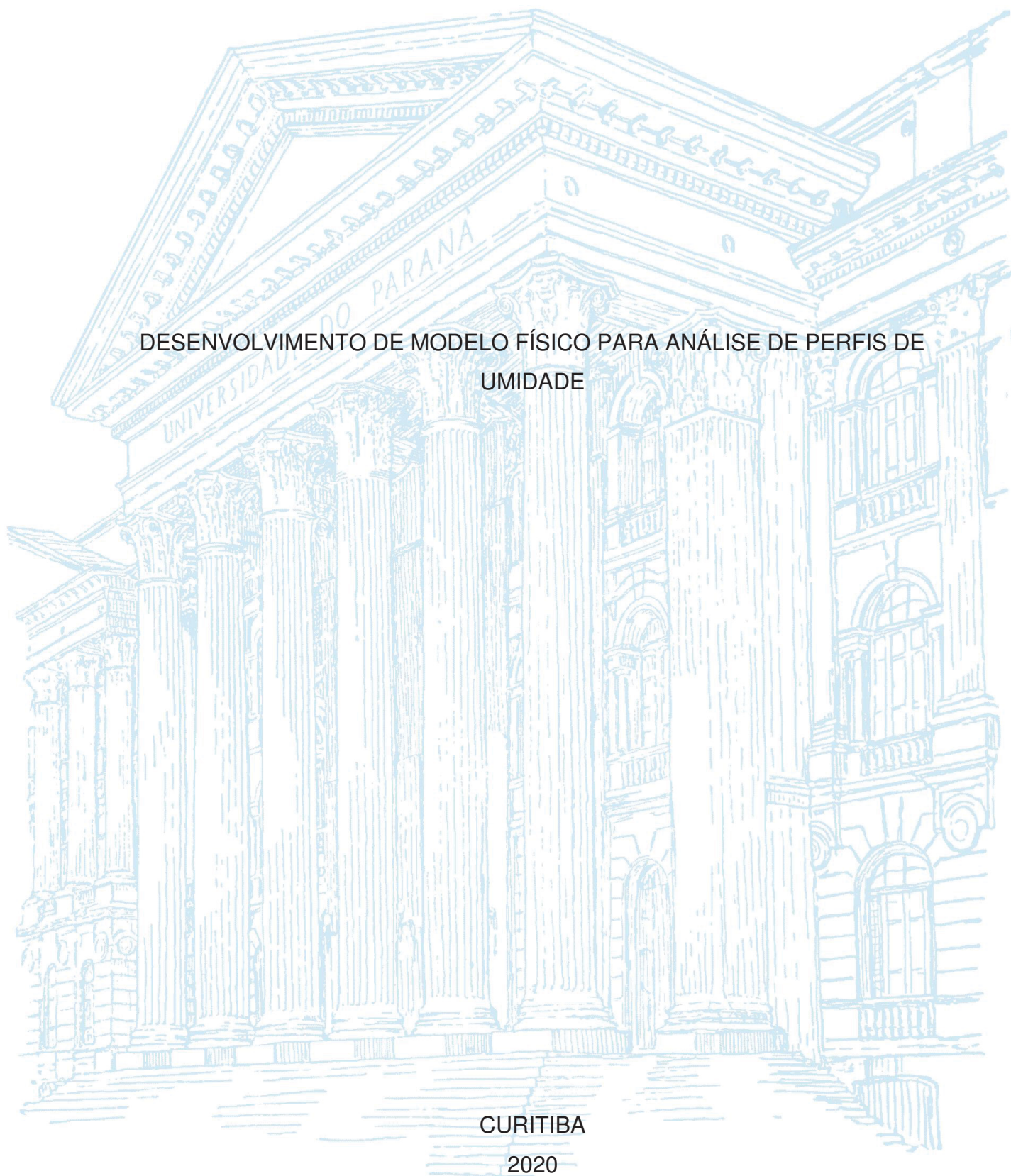
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ISABEL CRISTINA SALAH

DESENVOLVIMENTO DE MODELO FÍSICO PARA ANÁLISE DE PERFIS DE
UMIDADE

CURITIBA

2020



ISABEL CRISTINA SALAH

DESENVOLVIMENTO DE MODELO FÍSICO PARA ANÁLISE DE PERFIS DE
UMIDADE

Dissertação apresentada ao curso de Pós- Graduação em Engenharia de Construção Civil, área de concentração em Geotecnia, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vítor Pereira Faro

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S159d Salah, Isabel Cristina
Desenvolvimento de modelo físico para análise de perfis de
umidade [recurso eletrônico] / Isabel Cristina Salah – Curitiba,
2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de
Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vítor Pereira Faro

1. Infiltração. 2. Solos. 3. Umidade. I. Universidade Federal
do Paraná. II. Faro, Vítor Pereira. III. Título.

CDD: 624.15

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL - 40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ISABEL CRISTINA SALAH** intitulada: **DESENVOLVIMENTO DE MODELO FÍSICO PARA ANÁLISE DE PERFIS DE UMIDADE**, sob orientação do Prof. Dr. VITOR PEREIRA FARO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 20 de Outubro de 2020.

Assinatura Eletrônica
20/10/2020 17:05:17.0
VITOR PEREIRA FARO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
20/10/2020 17:19:40.0
EDGAR ODEBRECHT
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica
20/10/2020 16:54:01.0
LIAMARA PAGLIA SESTREM
Avaliador Externo (null)

Assinatura Eletrônica
20/10/2020 16:54:08.0
ALESSANDER CHRISTOPHER MORALES KORMANN
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado da dedicação de muitas pessoas ao meu redor e agradeço a todos que tornaram essa caminhada possível.

Agraço aos meus pais, por permitirem que eu me dedicasse totalmente à minha vida acadêmica durante toda a graduação e durante dois anos de Mestrado, me dando todo o apoio financeiro, psicológico e emotivo que eu precisei.

Ao meu orientador, Professor Dr. Vítor Pereira Faro, exemplo de pessoa e de profissional, por me incentivar mesmo quando nada parecia dar certo; por me apoiar e me orientar em todas as decisões; por confiar em mim desde a minha admissão no programa.

Aos meus amigos Amanda, Isabela, Leandro, Marianne e Renathielly, por me acolherem fora de casa e me ajudarem e tornar Curitiba a minha casa; por todas as conversas, risadas e apoio.

Aos colegas de sala 28, por todos os ensinamentos e aprendizados trocados durante minha participação no projeto de pesquisa.

À Autopista Litoral Sul - Grupo Arteris, pela oportunidade de participar de um projeto de pesquisa que me ensinou muito sobre a área que atuo; por me conceder uma bolsa de Mestrado; por permitir a aquisição dos materiais necessários ao desenvolvimento dessa pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que dedicaram seu tempo para me auxiliar no desenvolvimento dessa pesquisa, seja nos ensaios de laboratório, na preparação dos materiais, nas ideias e sugestões de melhorias.

RESUMO

Deslizamentos rasos desencadeados por chuva ocorrem, principalmente, pela perda de sucção mátrica devido à infiltração. O avanço da frente de umedecimento em solos não saturados, ocasionado pela precipitação, aumenta o teor de umidade, reduzindo a parcela de sucção e, consequentemente, a resistência ao cisalhamento do solo. O entendimento da variação da umidade em profundidade e em função da precipitação é, portanto, fundamental em análises de estabilidade de taludes. Posto isto, este trabalho permitiu a determinação de perfis de umidade para diferentes intensidades de precipitação com diferentes níveis de umidade inicial para um solo da região da Serra do Mar. Um modelo físico composto por uma caixa em acrílico com dimensões de 93,00 x 93,00 cm de área transversal e 80,00 cm de altura de solo e por um simulador de chuva, capaz de simular precipitações de até 105 mm/h de intensidade, foi monitorado através de sensores de umidade do solo e sensor de umidade e temperatura do ar. O solo foi caracterizado com um comportamento bimodal para curva de retenção de água, ajustada pelo modelo proposto por Fredlund et al. (2000), e teve sua função de condutividade hidráulica ajustada pelo modelo proposto por Leong e Rahardjo (1997) e o pelo Método do Perfil Instantâneo, que utiliza dados de umidade em campo para determinação da relação entre teor de umidade e condutividade. Foram realizadas seis simulações de precipitação e o sistema foi monitorado por dois meses. Em relação ao avanço da frente de umedecimento, a variação da umidade nas camadas mais superficiais aconteceu após a primeira simulação de precipitação. Para as camadas mais profundas variações significativas de umidade aconteceram apenas após um acumulado de 225,5 mm de precipitação e para uma precipitação de intensidade elevada. Para todos os sensores, a primeira variação significativa de umidade aconteceu em um tempo maior que a segunda variação, resultado da relação entre permeabilidade não saturada e a sucção. Dessa forma, concluiu-se, para o solo estudado nas condições de laboratório, que em períodos sem precipitação, em que os valores de teor de umidade do solo são mantidos abaixo de 25%, é necessário um volume considerável de chuva para que haja variações significativas de sucção em profundidade e o tempo para que essa variação ocorra é elevado. Já para períodos chuvosos, e, que os valores de teor de umidade são mantidos acima de 25%, o volume necessário para que haja variações é inferior, assim como o tempo para que ocorra variação da sucção em profundidade. Em relação à intensidade da precipitação, observou-se a influência desse parâmetro no tempo de recuperação das condições iniciais do solo após a simulação. Chuvas de elevada intensidade ocasionam alterações no teor volumétrico de água e na sucção que permanecem por tempo superior a 96 horas após o fim de sua ocorrência. Para o modelo numérico, observou-se a forte influência da função de condutividade hidráulica nos resultados. A função determinada através do Método do Perfil Instantâneo apresentou resultados mais similares aos dados de instrumentação.

Palavras-chave: Solos não saturados; perfil de umidade; infiltração; modelo físico; modelagem numérica.

ABSTRACT

Shallow landslides triggered by rainfall occur mainly due to loss of suction by infiltration process. The increase of the wetting front in unsaturated soils, caused by precipitation, increases the moisture content, reducing the suction and, consequently, the shear strength of the soil. The understanding of the suction variation in depth and in function of the precipitation is fundamental in slope stability analyzes. Therefore, this research allowed the determination of moisture profiles for different intensities of precipitation with different levels of initial moisture for a soil collected in the Serra do Mar region. A physical model composed by an acrylic box with dimensions of 93.00 x 93.00 cm of cross-sectional area and 80.00 cm of soil height and by a rainfall simulator, capable of simulating precipitations of up to 105 mm/h of intensity, was monitored with soil moisture probes and air humidity and air temperature sensor. The soil was characterized with a bimodal behavior for the soil-water characteristic curve, adjusted by the model proposed by Fredlund et al. (2000), and had its hydraulic conductivity function adjusted by the model proposed by Leong and Rahardjo (1997) and by the Instantaneous Profile Method, which uses field moisture data to determine the relationship between moisture content and conductivity. Six precipitation simulations were carried out and the system was monitored for two months. In relation to the advance of the wetting front, the variation in the moisture content in the most superficial layers occurred after the first precipitation simulation. For the deepest layers, significant variations in moisture content occurred only after an accumulation of 225.5 mm of precipitation and for high intensity precipitation. For all sensors, the first significant variation in moisture content occurred in a longer time than the second variation, resulting from the relationship between unsaturated permeability and suction. Thus, it was concluded that in periods without precipitation, in which volumetric water content was inferior to 25%, a considerable volume of rain is necessary for there to be significant variations in suction in depth and the time for this variation to occur is high. For rainy periods, in which volumetric water content is up to 25%, on the other hand, the volume necessary for variations to occur is lower, as well as the time for variations in suction to occur in depth. Regarding the intensity of precipitation, the influence of this parameter on the recovery time of the initial soil conditions after the simulation was observed. High intensity rains cause changes in the volumetric water content and in the suction that remain for more than 96 hours after the end of its occurrence. For the numerical model, there was a strong influence of the hydraulic conductivity function on the results. The function determined using the Instantaneous Profile Method showed results more similar to the instrumentation data.

Keywords: Unsaturated soils; moisture content profile; infiltration; physical model; numerical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Municípios com ocorrências de deslizamentos entre 2013 e 2017.....	16
Figura 2 – Distribuição da poropressão no solo.....	18
Figura 3 – Curva de retenção característica para um solo siltoso	21
Figura 4 – Curvas de retenção de água características para solos arenosos, siltosos e argilosos	22
Figura 5 – Exemplos de curvas de retenção de água com diferentes comportamentos	23
Figura 6 – Estrutura e distribuição dos poros para solos com comportamento unimodal e bimodal.....	23
Figura 7 – Tipos de fluxo entre amostra de solo e papel filtro	28
Figura 8 – Curva de retenção de água e função de condutividade.....	30
Figura 9 – Modelo físico realizado por Rianna et al. (2014).....	46
Figura 10 – Esquema geral do modelo físico.....	50
Figura 11 – Fluxograma de amostras de solo coletadas	51
Figura 12 – Linha do tempo do desenvolvimento da pesquisa	52
Figura 13 – Fluxograma de ensaios realizados na amostra deformada	53
Figura 14 – Fluxograma das simulações de precipitação	54
Figura 15 – Mapa geológico da área de estudo.....	55
Figura 16 – Mapa com localização dos pontos de coleta de amostras.....	55
Figura 17 – Preparação do solo: (a) solo coletado, (b) processo de secagem e (c) solo uniformizado.....	56
Figura 18 – Ensaio de sedimentação e peneiramento.....	57
Figura 19 – Curva de distribuição granulométrica do solo estudado	57
Figura 20 – Determinação do limite de liquidez (a) e limite de plasticidade (b)	58
Figura 21 – Coleta de amostra indeformada para determinação de índices físicos .	59
Figura 22 – Distribuição das amostras em função da umidade volumétrica	61
Figura 23 – Procedimentos do ensaio do papel filtro	62
Figura 24 – Resultados do ensaio do papel filtro para as curvas de umedecimento e secagem	63
Figura 25 – Curva de retenção de água	64
Figura 26 – Sequência de montagem do permeâmetro.....	65

Figura 27 – Função de condutividade: (a) equação proposta por Leong e Rahardjo (1997) e (b) Método do Perfil Instantâneo	67
Figura 28 – Distribuição da compactação.....	69
Figura 29 – Fases da compactação.....	70
Figura 30 – Aplicação de bentonita na interface solo acrílico	71
Figura 31 – Sistema de simulação de chuva	74
Figura 32 – Modelo de aspersor de cone cheio.....	75
Figura 33 – Determinação da uniformidade e intensidade: (a) pluviômetro, (b) distribuição das cápsulas e pluviômetros e (c) cápsulas	76
Figura 34 – Padrão de geração de gotas.....	76
Figura 35 – Locação dos instrumentos (a) em planta e (b) em corte.....	80
Figura 36 – Procedimentos de instalação dos piezômetros.....	83
Figura 37 – Datalogger para aquisição de dados dos piezômetros elétricos.....	84
Figura 38 – Volume de medida do sensor de umidade EC-5	85
Figura 39 – Instalação do sensor de umidade	86
Figura 40 – Calibração dos sensores de umidade.....	87
Figura 41 – Resultados dos ensaios de calibração dos sensores de umidade.....	88
Figura 42 – Concepção do modelo numérico.	89
Figura 43 – Dados de monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar	92
Figura 44 – Comparação entre dados de umidade relativa do ar registrados pelo sensor e por estação meteorológica (médias diárias)	93
Figura 45 – Comparação entre dados de temperatura do ar registrados pelo sensor e por estação meteorológica (médias diárias)	93
Figura 46 – Leituras dos piezômetros.....	94
Figura 47 – Monitoramento dos sensores de umidade instalados a 5 cm de profundidade.....	96
Figura 48 – Monitoramento dos sensores de umidade instalados a 15 cm de profundidade.....	97
Figura 49 – Monitoramento dos sensores de umidade instalados a 35 cm de profundidade.....	97
Figura 50 – Monitoramento dos sensores de umidade instalados a 55 cm de profundidade.....	98

Figura 51 – Monitoramento dos sensores de umidade instalados a 75 cm de profundidade	98
Figura 52 – Perfis de umidade para os sensores posicionados no lado esquerdo: (a) Simulação 1; (b) Simulação 2; (c) Simulação 3; (d) Simulação 4; (e) Simulação 5; (f) Simulação 6	99
Figura 53 – Perfis de umidade para os sensores posicionados no lado direito: (a) Simulação 1; (b) Simulação 2; (c) Simulação 3; (d) Simulação 4; (e) Simulação 5; (f) Simulação 6	101
Figura 54 – Teor de umidade inicial e variação da umidade: (a) sensores posicionados no lado esquerdo e (b) sensores posicionados no lado direito	104
Figura 55 – Perfil de umidade inicial e após 96 horas para precipitação com intensidade de: (a) 35 mm/h; (b) 52,5 mmh; (c) 105 mm/h	106
Figura 56 – Perfis de umidade: (a) modelo físico; (b) modelo numérico utilizando Leong e Rahardjo (1997); (c) modelo numérico utilizando perfil instantâneo	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos matemáticos para determinação de curva de retenção de água unimodal	25
Tabela 2 – Modelos matemáticos para determinação da função de condutividade hidráulica do solo	31
Tabela 3 – Resultados dos ensaios de caracterização	58
Tabela 4 – Índices físicos de campo	59
Tabela 5 – Índices físicos da literatura	60
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de permeabilidade	66
Tabela 7 – Coeficiente de variação dos parâmetros monitorados durante a compactação	72
Tabela 8 – Valores médios dos índices físicos determinados pelos aneis	73
Tabela 9 – Características das regiões de precipitação semelhante	76
Tabela 10 – Coeficiente de uniformidade por região	77
Tabela 11 – Intensidade de precipitação	78
Tabela 12 – Simulações de precipitação	78
Tabela 13 – Distribuição dos sensores em profundidade	79
Tabela 14 – Resumo principais características dos instrumentos	81
Tabela 15 – Equação de calibração dos sensores de umidade	87
Tabela 16 – Dados de entrada no modelo numérico para camada drenante	89
Tabela 17 – Dados de fluxo aplicado ao modelo numérico	91
Tabela 18 – Considerações realizadas para estimativa da radiação líquida	107
Tabela 19 – Considerações realizadas para estimativa da evaporação real	108

LISTA DE SÍMBOLOS

C_u	- Coeficiente de Uniformidade de Christiansen
D_v	- Coeficiente de difusão de vapor de água
I_p	- Índice de plasticidade
Q_n	- Radiação líquida (mm/dia)
S_e	- Grau de saturação efetivo
S_r	- Grau de saturação na condição residual
k_{sat}	- Condutividade hidráulica na condição saturada
u_a	- Pressão de ar
u_w	- Pressão de água nos poros
θ_r	- Teor volumétrico de água residual
θ_s	- Teor volumétrico de água na condição saturada
ρ_v	- Densidade de vapor
ρ_w	- Densidade da água
ψ_b	- Sucção de entrada de ar
ψ_g	- Potencial gravitacional
ψ_o	- Potencial osmótico
ψ_p	- Potencial hidrostático
ψ_r	- Sucção estimada na condição residual
ψ_t	- Potencial térmico
ψ_{total}	- Potencial total de água no solo
w	- Teor de umidade gravimétrica
w_s	- Teor de umidade gravimétrica na saturação
Θ	- Teor de umidade normalizado
AE	- Evaporação real por unidade de tempo (mm/dia)
$C(h_m)$	- Capacidade hídrica específica
PE	- Potencial de evaporação por unidade de tempo (mm/dia)
S	- Grau de saturação
g	- Aceleração da gravidade
k	- Condutividade hidráulica
θ	- Teor volumétrico de água
θ_s	- Teor volumétrico de água na saturação

σ - Tensão normal total

ψ - Potencial matricial ou sucção mátrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE SOLOS NÃO SATURADOS	18
2.1.1 Potencial de água no solo.....	19
2.1.2 Curva de retenção de água (CRA).....	20
2.1.2.1 Modelos de ajuste para a curva de retenção de água	24
2.1.2.2 Métodos para obtenção da curva de retenção de água	26
2.1.3 Fluxo de água e condutividade hidráulica em solos não saturados	28
2.1.3.1 Método do Perfil Instantâneo	32
2.2 ANÁLISES DE FLUXO DE ÁGUA LÍQUIDA EM SOLOS NÃO SATURADOS ...	33
2.3 MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO	36
2.4 MODELOS FÍSICOS E SIMULADORES DE PRECIPITAÇÃO.....	38
2.5 MONITORAMENTO DA ÁGUA NO SOLO	40
2.5.1 Piezômetros.....	41
2.5.2 Sensores de umidade	41
2.6 INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO PERFIL DE SUCÇÃO E DESLIZAMENTOS	42
2.6.1 Estudos envolvendo modelos físicos	43
2.6.2 Estudos envolvendo experimentos de campo e modelagem numérica	47
3 CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO FÍSICO	50
3.1 PLANEJAMENTO E PREPARAÇÃO DA PESQUISA.....	51
3.2 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	54
3.2.1 Ensaios de caracterização	56
3.2.2 Curva de retenção de água pelo método do papel filtro	60
3.2.3 Ensaio de permeabilidade	64
3.3 COMPACTAÇÃO DO SOLO	68
3.4 SIMULAÇÃO DE CHUVA	73
3.5 INSTRUMENTAÇÃO	79

3.5.1 Sensor de umidade e temperatura do ar	81
3.5.2 Piezômetros elétricos.....	82
3.5.3 Sensores de umidade	85
3.6 MODELAGEM NUMÉRICA	88
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	92
4.1 INSTRUMENTAÇÃO	92
4.1.1 Sensor de umidade e temperatura do ar	92
4.1.2 Piezômetros elétricos.....	94
4.1.3 Sensores de umidade	96
4.2 ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO REAL	107
4.3 MODELO NUMÉRICO	108
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
5.1 LIMITAÇÕES	113
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	113
REFERÊNCIAS	115

1 INTRODUÇÃO

Deslizamentos desencadeados por chuvas são comuns em regiões tropicais e subtropicais e podem ocasionar danos sociais, econômicos e ambientais. Em regiões onde o lençol freático é profundo, os solos encontram-se na condição não saturada e suscetíveis a escorregamentos rasos desencadeados por chuvas intensas (RAHARDJO et al., 2005). No Brasil, a Serra do Mar, cadeia montanhosa que se estende do estado do Rio de Janeiro ao norte do estado de Santa Catarina, é exemplo típico disso. A região é alvo constante de deslizamentos ocasionados por chuvas de grande intensidade.

Movimentos de massa, dentre eles escorregamentos, corridas de massa e quedas de blocos, podem ser catastróficos, causando danos materiais e até mesmo perdas de vidas humanas. As causas variam desde a ação antrópica, com o carregamento, através da aplicação de forças externas, de uma encosta, retirada da cobertura vegetal de maneira indevida (favorecendo os processos de infiltração e erosão) ou a realização de cortes inadequados, até a ocorrência de precipitações intensas (TSAI; WANG, 2011). Em encostas naturais, o comportamento é, normalmente, resultado de diferentes processos hidromecânicos, os quais dependem de propriedades mecânicas e hidrológicas do solo, geometria e estrutura geológica da encosta e das condições de contorno iniciais a que ela está submetida. Alterações nessas condições podem desencadear esforços e deslocamentos (SORBINO; NICOTERA, 2013). Os deslizamentos induzidos por chuva ocorrem geralmente em áreas montanhosas, particularmente em locais com camadas de solos pouco espessas e com propriedades e origens diferentes (KIM et al., 2017).

As ocorrências desse tipo de deslizamento estão, em geral, relacionadas à perda de sucção mátrica do solo ocasionada pela infiltração da precipitação. A sucção, pressão de água negativa que atua nos poros, contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento do solo, sendo o principal fator de alteração do comportamento mecânico de solos não saturados. Esse fator está diretamente ligado ao grau de saturação, sendo que na medida em que o grau de saturação aumenta, a parcela de resistência ocasionada pela sucção diminui. Assim, quando uma encosta está submetida ao processo de infiltração, com o aumento do teor de umidade do solo, a encosta pode se tornar instável. Além disso, quando esse processo ocasiona a saturação da camada superficial de solo, cria-se um lençol freático suspenso, com a

geração de poropressão positiva e redução ainda maior da resistência ao cisalhamento do solo (LI et al., 2005).

Este trabalho propõe a determinação de perfis de umidade de um solo proveniente da região da Serra do Mar, submetido a diferentes intensidades de precipitação, além de diferentes níveis de umidade inicial. A partir de um modelo físico utilizando um simulador de chuva e instrumentos de medição de umidade, o trabalho avaliou como ocorre a variação da umidade desse solo em função da intensidade da precipitação e quais as influências da umidade inicial nessa variação. Os resultados foram comparados com simulação numérica.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral determinar, a partir de um modelo físico, perfis de umidade para um solo submetido a diferentes intensidades e durações de precipitação e teores de umidade inicial, além de comparar os resultados obtidos com simulações numéricas.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Desenvolver um modelo físico para a determinação de perfis de umidade;
- b) caracterizar o solo através da sua curva de retenção e água e função de condutividade hidráulica;
- c) simular diferentes intensidades de precipitação no solo com diferentes valores de umidade inicial;
- d) comparar os resultados com modelagem numérica;

1.2 JUSTIFICATIVA

A mecânica dos solos não saturados tem grande importância na engenharia, sendo que a maior parte dos problemas geotécnicos em solos com saturação parcial envolvem variações nos valores de sucção ou no grau de saturação. Essas variações podem gerar significativas mudanças de volume, ocasionando deformações excessivas, ou redução de resistência do solo, com consequentes problemas de estabilidade. Diversos avanços foram obtidos ao longo dos últimos anos, entretanto, ainda existem muitas incertezas acerca de quais princípios da mecânica dos solos

clássica podem se estender para os solos não saturados, uma vez que essa linha de pesquisa dentro da engenharia geotécnica se iniciou quase 40 anos depois (FREDLUND, 2014).

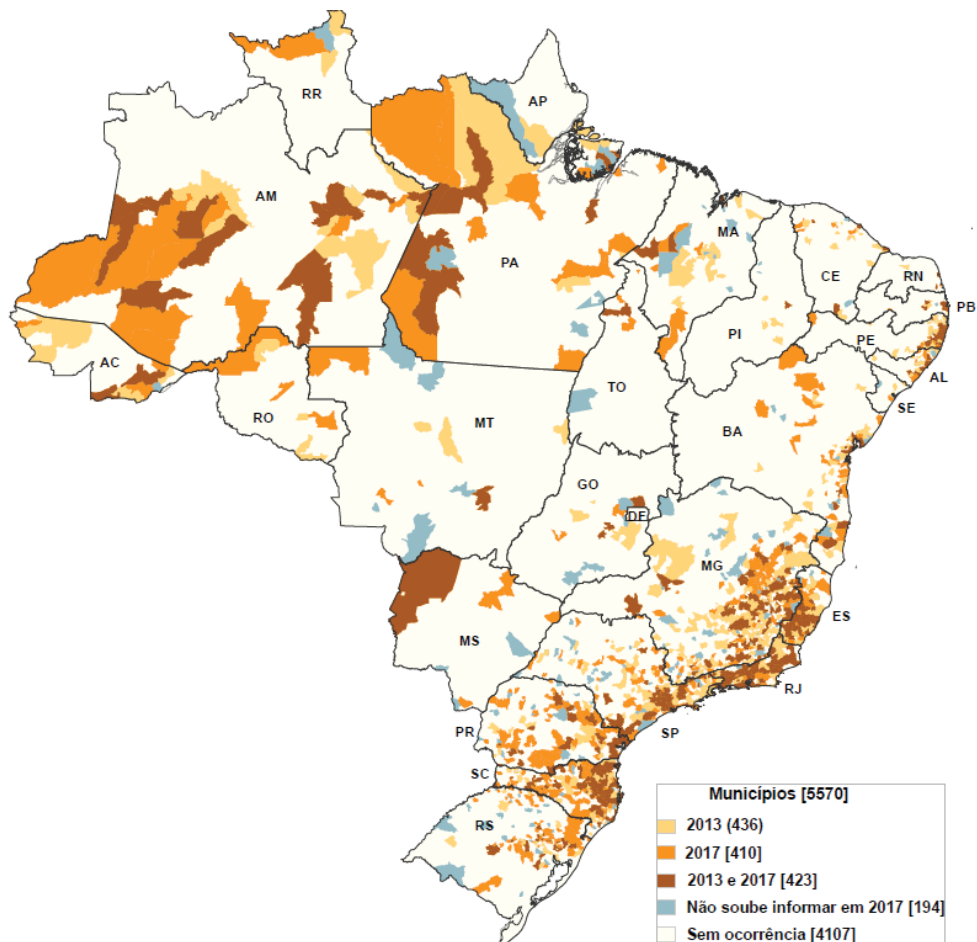
Os primeiros fatores desencadeadores de movimentos de massa são a distribuição espacial e temporal do nível d'água (que afeta os valores de poropressão positiva e negativa), o tipo de solo e a declividade. Em solos não saturados, a sucção matricial é a principal variável em análises de suscetibilidade a deslizamentos, sendo influenciada pela altura de infiltração da água da chuva. A altura de infiltração, por sua vez, é afetada pelos valores de sucção inicial, resultado de chuvas antecedentes. Essa relação entre sucção inicial, infiltração e variação da sucção torna complexa a determinação de perfil de sucção em solos não saturados (KIM et al., 2017). Além disso, tem-se dificuldade em quantificar as condições de contorno do fluxo na superfície de encostas em relação à infiltração e seus efeitos nas condições de poropressão. É importante, portanto, entender a resposta de uma encosta a diferentes condições de precipitação em termos de mudanças na poropressão ocasionados por mudanças no teor de umidade (RAHARDJO et al., 2005).

Os movimentos de solo e/ou rocha, principalmente quando atingem regiões urbanizadas ou povoadas, podem causar prejuízos do ponto de vista econômico, ambiental e, principalmente, social. O Brasil é considerado um país com alta suscetibilidade aos movimentos de massa devido às condições climáticas marcadas por verões com chuvas intensas e existência de regiões de grandes maciços montanhosos (CEMADEN, 2019). De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018b), baseado no censo demográfico de 2010, mais de 8 milhões de brasileiros vivem em áreas de risco em 872 municípios do país. Apenas em 2018, mais de 45 mil pessoas foram afetadas por algum tipo de movimento de massa e 113 ocorrências foram registradas, segundo o Relatório Gerencial de Danos Informados, disponibilizado pelo Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (SINPDEC, 2019).

Entre 2013 e 2016, 833 municípios foram atingidos por movimentos de solo, rocha ou detritos, em morros, taludes e encostas, tendo como principal causa a infiltração da água das chuvas combinada com mudanças nas condições naturais do relevo. As regiões Sul e Sudeste foram as que apresentaram a maior concentração de municípios atingidos por escorregamentos ou deslizamentos, sendo a área litorânea a mais afetada, conforme apresentado na Figura 1 (IBGE, 2018a). A região

de maior concentração de movimentos de massa é coincidente, portanto, com a localização da cadeia montanhosa da Serra do Mar. Ainda que muitos deslizamentos estejam relacionados à ocupação indevida e às ações antrópicas, o entendimento do comportamento do solo dessa região em função da precipitação é fundamental para análises de estabilidade de taludes.

FIGURA 1 – MUNICÍPIOS COM OCORRÊNCIAS DE DESLIZAMENTOS ENTRE 2013 E 2017



FONTE: IBGE (2018a).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo foram apresentadas as motivações da pesquisa, a justificativa para escolha do tema e os objetivos esperados com o desenvolvimento do trabalho.

O segundo capítulo refere-se ao referencial teórico que embasou a pesquisa. São apresentados alguns conceitos importantes da mecânica dos solos não saturados, como potencial de água, curva de retenção de água e fluxo. Apresentam-se também conceitos relacionados aos simuladores de precipitação e instrumentação. Por fim, são abordados trabalhos acadêmicos relacionados ao tema que auxiliaram no desenvolvimento e tomada de decisões durante a pesquisa.

O terceiro capítulo aborda, de forma detalhada, as etapas da concepção e desenvolvimento do modelo físico, os ensaios realizados e procedimentos para preparação do solo; o processo de compactação; o processo de desenvolvimento do simulador de precipitação e demais métodos relacionados ao trabalho.

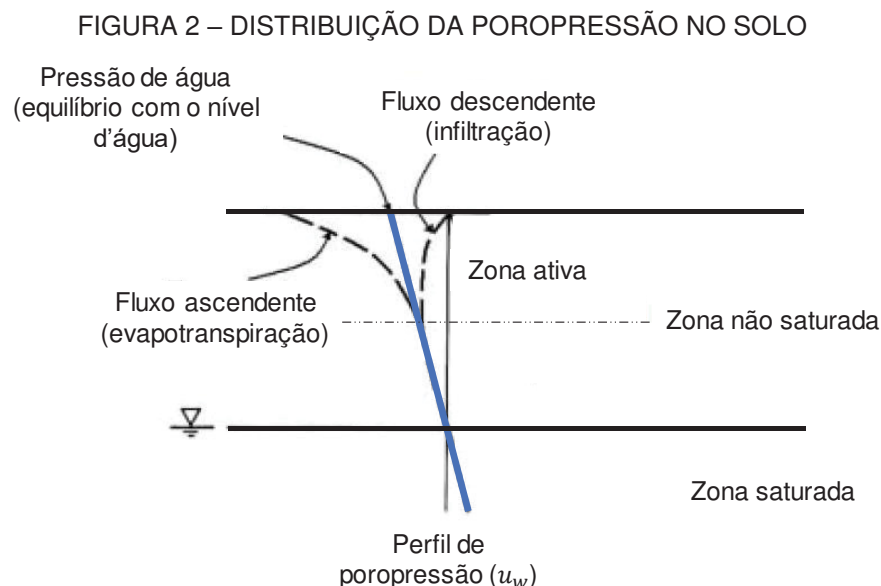
No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos com a instrumentação ao longo das simulações de precipitação e os resultados obtidos com o modelo numérico. Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais da pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados o referencial teórico da pesquisa, com definições importantes para o entendimento do trabalho, e algumas conclusões obtidas por outros autores para o tema.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE SOLOS NÃO SATURADOS

A zona não saturada de um solo é referida como a região entre a superfície do terreno e o nível d'água, ainda que a franja capilar logo acima do nível d'água seja essencialmente saturada. Na engenharia geotécnica, toda a região submetida à poropressão negativa é chamada de zona não saturada, sendo fortemente influenciada pelas condições climáticas (zona ativa). A água pode ser removida do solo pela evaporação ou evapotranspiração ocasionada pela vegetação e, por outro lado, a precipitação pode aumentar o teor de umidade através da infiltração de água nos poros (Figura 2) (FREDLUND et al., 2012).



FONTE: Adaptado de Fredlund et al. (2012).

A zona não saturada de um solo é classificada como sendo constituída por três fases: sólidos, água e ar. Fredlund e Morgentern (1977) reconheceram a existência de uma quarta fase, chamada de interface ar-água ou membrana contrátil, cuja propriedade mais significativa é a possibilidade de exercer uma tensão de tração,

atuando como uma membrana elástica sob tensão conectada através da estrutura do solo. Nas relações de volume-massa de um solo não saturado, a consideração do solo como um sistema trifásico é suficiente. Entretanto, ao se analisar o estado de tensões de um sistema multifásico contínuo, é necessário compreender que a interface ar-água se comporta como uma fase independente (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

No estudo dos solos não saturados, as variáveis de estado de tensão desempenham o papel mais importante na formulação do comportamento desses materiais. As duas variáveis mais utilizadas para expressar esse estado em solo com saturação parcial são a tensão normal líquida ($\sigma - u_a$), sendo a diferença entre a tensão normal total (σ) e a pressão de ar (u_a); e a sucção matricial ($u_a - u_w$), sendo a diferença entre a pressão de ar (u_a) e a pressão de água nos poros (u_w) (FREDLUND et al., 2012).

2.1.1 Potencial de água no solo

O potencial total de água no solo pode ser definido como a soma de cinco componentes:

$$\psi_{\text{total}} = \psi_t + \psi_p + \psi_g + \psi_o + \psi_m \quad (1)$$

O potencial térmico (ψ_t) é desprezível, pois em condições normais a água presente no solo apresenta pouca variação de temperatura. O potencial gravitacional (ψ_g) depende apenas da altura do ponto considerado em relação a um referencial. A componente de pressão hidrostática (ψ_p) é considerada quando a pressão atuante na água for maior do que a pressão atmosférica, e representa o peso da coluna de água acima de um ponto considerado, assumindo valores positivos no caso de solos saturados (REICHARDT; TIMM, 2004).

As duas principais componentes do potencial de água no solo são, portanto, o potencial matricial (ψ_m) e potencial osmótico (ψ_o), os quais representam as componentes relacionadas a fontes internas do solo. O potencial matricial, mais conhecido como sucção matricial na literatura, representa a interação solo-água tanto com o esqueleto de solo quanto com a fase gasosa e, neste trabalho, é abordado apenas com a simbologia “ ψ ”. Já o potencial osmótico, também chamado de sucção

osmótica, depende da concentração de sais dissolvidos na água. Os valores de potencial osmótico são muito menores do que os matriciais para solos não salinos, logo, são desconsiderados em análises geotécnicas nos solos comumente encontrados (FREDLUND; RAHARDJO, 1993; BAKER; FRYDMAN, 2009).

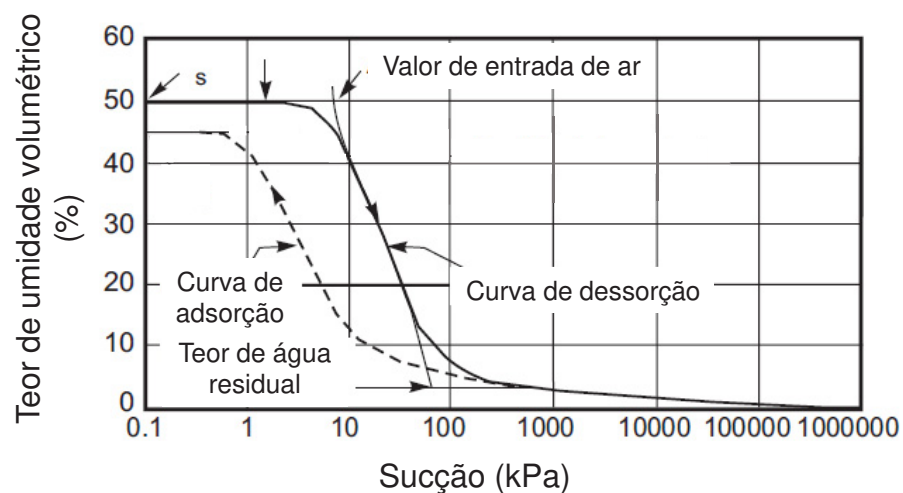
O potencial matricial resulta da combinação dos efeitos de capilaridade e adsorção. O efeito de adsorção, segundo Baker e Frydman (2009), é resultante da adesão entre moléculas de água e superfícies sólidas, sendo relacionado à existência de cargas superficiais não balanceadas na superfície do solo e à área superficial específica das partículas. O efeito da capilaridade, por outro lado, está relacionado à existência de forças de atração entre as moléculas, resultando na movimentação da água acima do lençol freático, contra a ação da gravidade. A altura de ascensão capilar nos solos está relacionada ao diâmetro dos vazios e possui um valor máximo a depender do tipo de solo. Para solos arenosos a altura de ascensão capilar é da ordem de centímetros, enquanto em solos argilosos esse valor pode atingir dezenas de metros (CARVALHO et al., 2015). Fredlund e Rahardjo (1993) consideram como sucção mátrica apenas a parcela relativa às forças de capilaridade, definida como a diferença entre a pressão de ar (u_a) e a pressão de água nos poros (u_w). A pressão de ar, em condições normais de campo, é nula, logo a sucção mátrica é igual à pressão negativa de água ($-u_w$).

2.1.2 Curva de retenção de água (CRA)

A curva de retenção de água de um solo é definida como a relação entre o teor de água e a sucção de um solo. O teor de água define a quantidade de água contida nos poros do solo e, nas ciências do solo, é mais referido como teor volumétrico de água (Θ). Na engenharia geotécnica, os termos mais utilizados são teor de umidade gravimétrica (w), razão entre o peso da água intersticial e das partículas sólidas, e o grau de saturação, que representa o percentual de vazios preenchidos por água. Já a sucção pode representar a sucção matricial ou a sucção total, englobando a parcela da sucção osmótica (FREDLUND; XING, 2014). A curva de retenção de água é utilizada como parâmetro de entrada em análises de infiltração e representa a capacidade do solo em reter água sobre diferentes valores de sucção (KIM et al., 2017).

A Figura 3 apresenta uma curva de retenção típica para solos siltosos com algumas definições importantes. O valor de entrada de ar é a sucção matricial na qual o ar começa a entrar nos maiores poros do solo. O teor de água residual é o teor a partir do qual um alto valor de variação de sucção é necessário para diminuir o volume de água no solo. A curva em linha cheia, nomeada como curva de dessorção, representa o comportamento do solo durante sua secagem. Já a tracejada, curva de adsorção, representa o caminho percorrido durante o umedecimento. As curvas se diferem devido ao fenômeno de histerese, associado à forma de absorção ou perda de água, sendo que, em geral, mais água é retida durante o processo de secagem do que é absorvida pelo solo durante o processo de umedecimento, para um mesmo valor de sucção (FREDLUND; XING, 1994; LU; LIKOS, 2004).

FIGURA 3 – CURVA DE RETENÇÃO CARACTERÍSTICA PARA UM SOLO SILTOSO



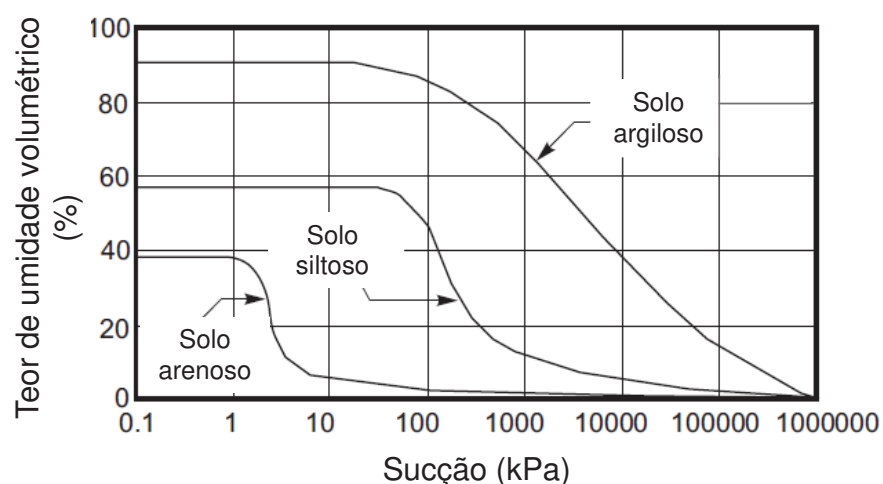
FONTE: Adaptado de Fredlund e Xing (1994).

Alguns fatores que alteram o comportamento da curva de retenção são o tamanho e forma dos grãos, a curva de distribuição granulométrica do solo, a densidade, a área superficial específica e as cargas disponíveis na superfície das partículas (cátions). Esses fatores estão relacionados à plasticidade do solo e, portanto, essa é uma das características que mais possuem influência no comportamento da curva de retenção. Em geral, quanto maior a plasticidade, maior o teor de umidade na condição saturada e maior o valor de entrada de ar (FREDLUND; XING, 1994; ZHOU et al., 2012). A Figura 4 apresenta curvas de retenção

características para solos arenosos, siltosos e argilosos, em que é possível observar a diferença de comportamento da curva para cada tipo de solo.

Em solos arenosos, o efeito da adsorção é mínimo, resultando na baixa capacidade de retenção de água a maiores níveis de sucção, e o efeito de capilaridade é dominante no mecanismo de sucção. Para as areias são observados baixos valores de entrada de ar devido ao tamanho relativamente grande dos poros capilares, controlados pelo diâmetro das partículas. Os solos arenosos se mantêm saturados até o ponto de valor de entrada de ar (AEV), em que os poros maiores começam o processo de drenagem e, a partir desse ponto, quanto mais uniforme a distribuição granulométrica do solo, mais íngreme a curva de retenção. Quando o ponto de teor volumétrico de água residual é atingido, grandes incrementos de sucção possuem pouca influência no teor volumétrico de água. Já em solos argilosos, a grande área superficial específica e a existência de cargas na superfície condicionam a uma elevada capacidade de adsorção de água, tendo uma forte influência em todo o comportamento da curva de retenção. O menor diâmetro das partículas resulta em maior valor de entrada de ar, ponto que normalmente é de difícil identificação na curva. Os solos siltosos possuem comportamento intermediário entre solos arenosos e argilosos (LU; LIKOS, 2004; GITIRANA JR.; FREDLUND, 2004).

FIGURA 4 – CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA CARACTERÍSTICAS PARA SOLOS ARENOSOS, SILTOSOS E ARGILOSOS

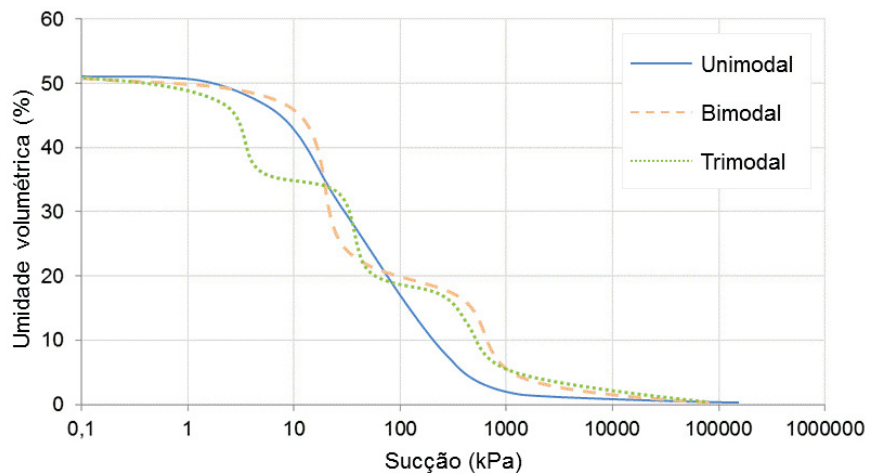


FONTE: Adaptado de Fredlund e Xing (1994).

As curvas apresentadas na Figura 3 e Figura 4 são chamadas de curvas unimodais. O comportamento da curva, entretanto, pode ser bimodal ou trimodal

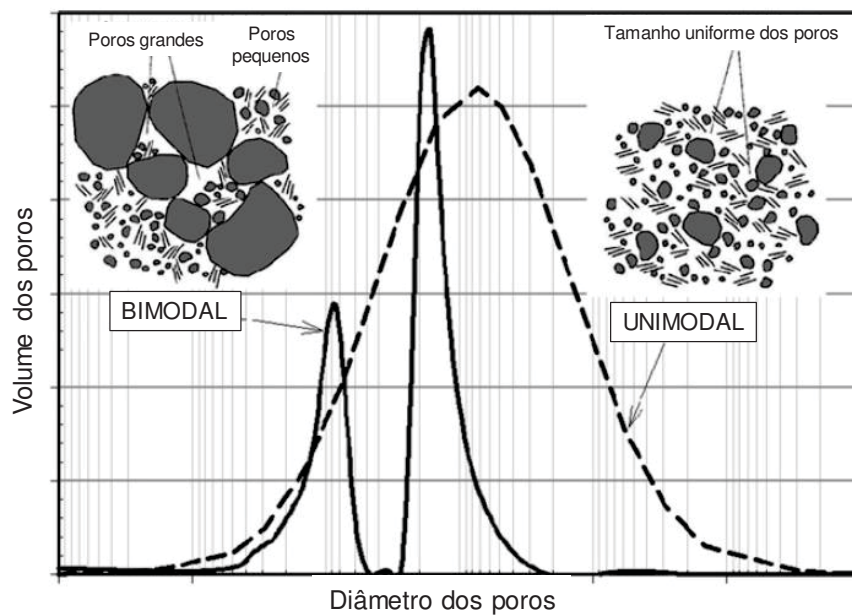
(Figura 5), e está relacionado à forma da distribuição granulométrica do solo em questão, conforme apresentado na Figura 6 (GITIRANA JR.; FREDLUND, 2004; SATYANAGA et al., 2013). Nesses casos, podem ser definidos mais de um valor de sucção de entrada de ar (ψ_b) e teor volumétrico de água residual (θ_r).

FIGURA 5 – EXEMPLOS DE CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA COM DIFERENTES COMPORTAMENTOS



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 6 – ESTRUTURA E DISTRIBUIÇÃO DOS POROS PARA SOLOS COM COMPORTAMENTO UNIMODAL E BIMODAL



FONTE: Adaptado de Satyanaga et al. (2013).

2.1.2.1 Modelos de ajuste para a curva de retenção de água

Técnicas experimentais para a mensuração direta da curva de retenção de água resultam em uma série de pontos decorrência da relação entre sucção e teor de umidade. A aplicação dessas medidas em problemas geotécnicos, entretanto, exige normalmente a descrição matemática da curva. Diversos métodos de aproximação matemática para ajuste da curva de retenção foram propostos na literatura, os quais utilizam, em geral, duas ou três constantes de ajuste, as quais estão relacionadas às características físicas do solo como a distribuição da curva granulométrica e o valor de entrada de ar. Modelos que incorporam três variáveis para o ajuste possuem resoluções matemáticas mais completas, e assim, permitem uma melhor flexibilidade na aproximação da curva teórica com a curva real. Os modelos propostos, em geral, utilizam uma variável de teor volumétrico de água normalizado (θ), dada pela Equação (2). Quando o teor volumétrico de água se aproxima do teor volumétrico na condição saturada (θ_s), a variável normalizada assume uma unidade. Se o teor volumétrico de água residual (θ_r) for igual a zero, a variável normalizada se iguala ao grau de saturação (S) (LU; LIKOS, 2004).

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

O grau de saturação efetivo (S_e) é outra variável normalizada utilizada nos modelos. A normalização é feita com a condição saturada ($S = 1$) e com o grau de saturação na condição residual (S_r) de maneira similar (Equação (3)). É importante salientar que o grau de saturação efetivo é igual ao teor volumétrico de água normalizado.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (3)$$

Na Tabela 1 são apresentados alguns modelos matemáticos propostos na literatura comumente utilizados, apresentados por Fredlund e Xing (1994) e Lu e Likos (2004), com descrição dos parâmetros utilizados. Tais modelos, entretanto, foram concebidos para solos com características unimodais.

TABELA 1 – MODELOS MATEMÁTICOS PARA DETERMINAÇÃO DE CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA UNIMODAL

Autores	Relações matemáticas	Variáveis
Brooks e Corey (1964)	$\theta = S_e = \begin{cases} 1 & \psi < \psi_b \\ \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda & \psi \geq \psi_b \end{cases}$	ψ_b – Sucção matricial de entrada de ar λ – Parâmetro ajuste (distribuição granulométrica)
Van Genuchten (1980)	$\theta = S_e = \left[\frac{1}{1 + (a\psi)^n} \right]^m$	a – Parâmetro de ajuste (valor de entrada de ar) n – Parâmetro de ajuste (distribuição granulométrica) m – Parâmetro de ajuste (simetria da curva)
Gardner (1958)	$\theta = \frac{1}{1 + q\psi^n}$	q – Parâmetro de ajuste (valor de entrada de ar) q – Parâmetro de ajuste (inclinação da curva)
Mualem (1976)	$\theta = \frac{1}{[1 + (a\psi)^n]^{1-1/n}}$	a – Parâmetro de ajuste (valor de entrada de ar) n – Parâmetro de ajuste (taxa de extração de água do solo)
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = C(\psi)\theta_s \left\{ \frac{1}{\ln[e + (\psi/a)^n]} \right\}^m$ $C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \right]$	n – Parâmetro de ajuste (distribuição granulométrica) ψ_r – Sucção estimada na condição residual θ_s – Teor volumétrico de água na condição saturada

FONTE: Adaptado de Fredlund e Xing (1994) e Lu e Likos (2004).

Para a determinação da curva de retenção de água em solos com características bimodais e trimodais, podem-se utilizar diferentes equações que se ajustem aos diferentes patamares. Para curvas bimodais, há na literatura modelos matemáticos que levam em conta essa peculiaridade, como os propostos por Fredlund et al. (2000), Gitirana Jr. e Fredlund (2004) ou Satyanaga et al. (2013).

A característica bimodal de um solo tem relação com a distribuição granulométrica das partículas, e esta é diretamente relacionada à distribuição de poros do solo (Figura 6). Esse fato indica que a distribuição granulométrica está

concentrada em dois tamanhos de partículas diferentes. De um ponto de vista matemático, um solo com essa graduação pode ser visto como a combinação de dois solos separados e essa visão permite definir um modelo matemático para ajuste de uma curva bimodal baseado na combinação de curvas unimodais. Dessa forma, podem-se utilizar diferentes equações que se ajustem aos diferentes patamares de uma curva bimodal ou trimodal. Dentro desse contexto, Fredlund et al. (2000) propuseram um modelo para ajuste de curvas bimodais baseado no modelo unimodal proposto por Fredlund e Xing (1994). A Equação (4) apresenta o modelo proposto.

$$\theta = \theta_s \left\{ s \left[\frac{1}{\ln \left(\exp(1) + \left(\frac{a_{fb}}{\psi} \right)^{n_{fb}} \right)^{m_{fb}}} \right] + (1-s) \left[\frac{1}{\ln \left(\exp(1) + \left(\frac{j_{fb}}{\psi} \right)^{k_{fb}} \right)^{l_{fb}}} \right] \right\} \left[1 - \left(\frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \right) \right] \quad (4)$$

No modelo proposto, w é o teor de umidade a qualquer valor de sucção; w_s é o teor de umidade na saturação; ψ é a sucção; ψ_r é a sucção na condição residual e demais parâmetros são de ajuste.

2.1.2.2 Métodos para obtenção da curva de retenção de água

A curva de retenção é o principal fator de caracterização do comportamento de um solo não saturado e, portanto, sua obtenção é fundamental para análise ou previsão do desempenho desse tipo de material. Conforme mencionado, a determinação da curva de retenção é realizada através da mensuração de pares de sucção e teor de umidade. A aferição desses pares pode ser executada através do processo de medição ou imposição da sucção. Em campo, as técnicas sempre envolvem a medição da sucção. Já em laboratório, pode-se ter a imposição ou a medição. Uma limitação das técnicas, tanto em laboratório quanto em campo, é o efeito de cavitação, em que há a expansão de microbolhas de ar no sistema para níveis de sucção acima de 100 kPa (CARVALHO et al., 2015). Carvalho et al. (2015) apresentam algumas técnicas comumente utilizadas para a determinação da curva de retenção em laboratório:

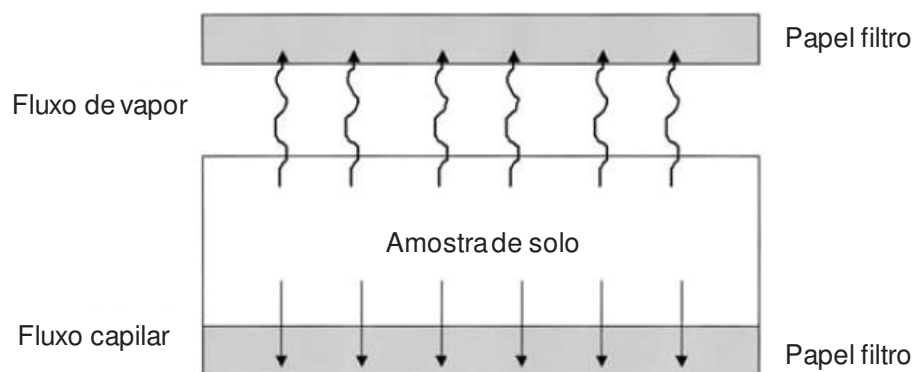
- a) Placa de sucção: o princípio de funcionamento do ensaio consiste na aplicação de carga hidráulica em amostra de solo, através da diferença de altura entre a amostra e a saída de água do sistema, com a determinação da umidade da amostra após equilíbrio da carga no sistema. A imposição da sucção através da diferença de altura tende a limitar o ensaio a sucções de até 40 kPa.
- b) Placa de pressão: o ensaio utiliza o princípio da translação de eixos, em que a pressão de ar é aumentada, mantendo a diferença entre pressão de ar e de água ($u_a - u_w$), a fim de evitar o fenômeno de cavitação, permitindo a medição de sucções com valores superiores a 100 kPa. O ensaio consiste na aplicação de pressão de ar em uma câmara hermeticamente fechada, permitindo a saída de água da amostra de solo através de uma placa porosa com elevada pressão de entrada de ar.
- c) Método do papel filtro: técnica mais simples e econômica para a determinação da sucção no solo, permitindo a medição de valores entre 10 e 100.000 kPa. Por se tratar do método utilizado nessa pesquisa, será abordado separadamente.
- d) Método por equilíbrio de vapor: o método consiste na determinação da sucção total por meio da umidade relativa do ar, através da imposição de uma umidade relativa em um ambiente que esteja em equilíbrio com o solo. São utilizadas soluções saturadas com pressão de vapor conhecida para auxiliar. Esse método pode também ser utilizado para calibração de outros equipamentos.

No método do papel filtro, o solo é colocado em contato com um material poroso, com capacidade para absorver água. A água presente no solo passará para o papel filtro até que o equilíbrio seja alcançado e, a partir da relação entre sucção e umidade do material poroso, tem-se a sucção atuante no solo. Os procedimentos para realização do ensaio são normatizados de acordo com a D5298-16 (ASTM, 2016). A relação entre sucção e umidade do material se dá através de uma curva de calibração, que se refere a curva de retenção de água do próprio material. A curva de calibração é a característica mais importante na avaliação da confiabilidade do resultado e, uma vez que o papel filtro é um material industrializado, com um rigoroso controle de qualidade, a calibração não deve variar muito em cada lote. Outro fator crucial na

medição da sucção do solo é o tempo de contato entre solo e papel filtro para que ocorra o equilíbrio entre os materiais. Para valores de sucção total entre 0 a 100 kPa o tempo de contato não é definido, mas certamente superior a 30 dias (MARINHO; OLIVEIRA, 2006).

O método permite a determinação tanto da sucção matricial, quanto da sucção total, que engloba a sucção osmótica. Se não houver parcela de sucção osmótica, a sucção total será apenas a sucção mátrica. A diferença na obtenção se dá no contato ou não do papel com o solo. A medida é dada em termos de sucção total quando não há contato, caso em que o fluxo de água ocorre em forma de vapor e, portanto, com atuação das forças capilares e osmóticas; quando há contato entre o solo e o papel, tem-se apenas as forças de capilaridade atuando no fluxo e, portanto, apenas a sucção matricial atuando (MARINHO; OLIVEIRA, 2006). A Figura 7 esquematiza os tipos de fluxo que podem ocorrer entre o papel filtro e o solo.

FIGURA 7 – TIPOS DE FLUXO ENTRE AMOSTRA DE SOLO E PAPEL FILTRO



FONTE: Marinho e Oliveira (2006).

2.1.3 Fluxo de água e condutividade hidráulica em solos não saturados

O fluxo de água em solos saturados é descrito através da lei de Darcy, em que a velocidade do fluxo através do solo é proporcional ao gradiente hidráulico. A proporção entre essas duas grandezas é descrita pela condutividade hidráulica (k), a qual é relativamente constante para um solo saturado específico. Essa proporção pode, também, ser aplicada a solos não saturados, de acordo com experimentos realizados por Buckingham (1907), Richard (1931) e Childs e Collis-George (1950), entretanto, seu valor é variável, uma vez que a água pode percolar apenas através de

poros já preenchidos. Em solos com saturação parcial, os poros preenchidos por ar se comportam similarmente à fase sólida (FREDLUND; XING, 1994).

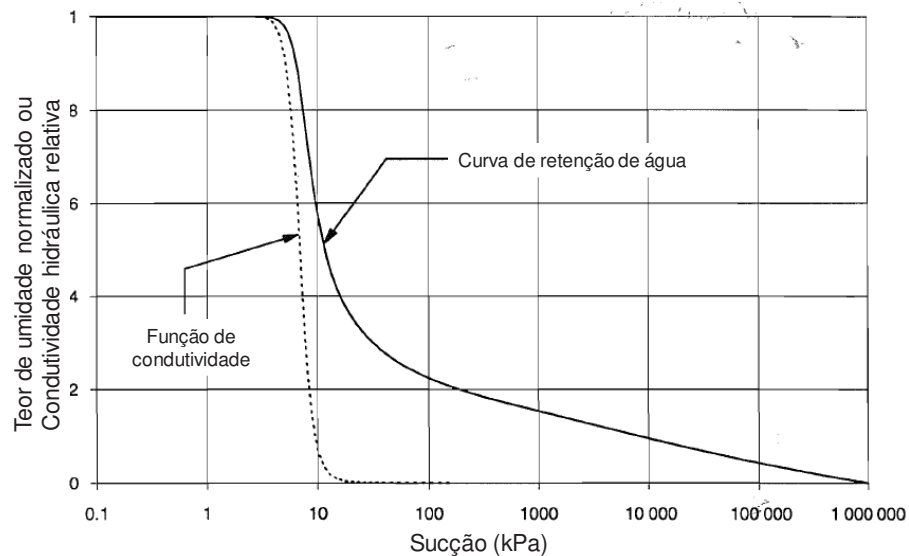
A nomenclatura da proporção k da lei de Darcy é divergente na literatura. O termo coeficiente de permeabilidade pode estar relacionado à permeabilidade intrínseca do solo, característica apenas do material poroso. Já a condutividade hidráulica é função não apenas das propriedades do material poroso, mas também das propriedades do líquido percolado. Uma vez que as propriedades da água são relativamente constantes, o coeficiente de proporcionalidade tende a ser denominado das duas maneiras na engenharia civil (DANIEL, 1994). Neste trabalho o termo utilizado será condutividade hidráulica.

A condutividade hidráulica é a propriedade, dentro do ramo da engenharia, que apresenta maior variação de valores. Em solos não saturados, para uma mesma amostra de solo, é possível obter valores oscilando em mais de 10 ordens de magnitude. Isso ocorre, pois o coeficiente é uma função relativamente única do teor de umidade do solo, e conseqüentemente da sucção mátrica, durante o processo de dessorção e adsorção (FREDLUND et al., 1994).

Quando o solo está saturado, a condutividade hidráulica está em seu valor máximo. À medida que a pressão de ar aumenta, há uma leve redução no valor da condutividade. Ao atingir a pressão de entrada de ar, a água é drenada dos poros maiores, permitindo a entrada de ar nos vazios; um aumento adicional na sucção a partir desse ponto resulta na drenagem contínua do sistema, resultando na redução do conteúdo de água disponível no solo. Dessa forma, o caminho disponível para o fluxo de água é reduzido, ocasionando a redução da condutividade hidráulica. A redução da condutividade é íngreme no início do processo de dessorção, pois os primeiros poros a perder água são os maiores e mais interligados (LU; LIKOS, 2004).

A Figura 8 apresenta uma curva de retenção de água típica para um solo arenoso com uma parcela de finos e sua correspondente função de condutividade hidráulica. Observa-se que, para uma pequena variação nos valores de sucção, a condutividade sofre uma variação considerável.

FIGURA 8 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA E FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE



FONTE: Adaptado de Fredlund et al. (1994).

É sugerido o termo função de condutividade hidráulica para representar a correlação entre a condutividade hidráulica e a sucção do solo. A determinação experimental da condutividade hidráulica não saturada é complexa, pois envolve equipamentos especiais e elevado tempo de execução (FREDLUND; RAHARDJO, 1993). Frente a isso, há diversos modelos matemáticos para a determinação da função de condutividade hidráulica para solos não saturados, os quais utilizam uma entre três abordagens: (1) equações empíricas, (2) modelos macroscópicos e (3) modelos estatísticos.

Equações empíricas. A abordagem empírica é baseada na medida direta da função condutividade hidráulica para um solo não saturado. Diversos autores propuseram equações que correlacionam a condutividade com o teor volumétrico de água ou com a sucção matricial, incorporando o valor da condutividade hidráulica saturada, as quais exigem um número mínimo de medidas para a determinação dos parâmetros de ajuste da curva (FREDLUND et al., 1994; CAI et al., 2014).

Modelos macroscópicos. Os modelos macroscópicos se baseiam numa visão mecanicista de representação dos poros preenchidos por água como feixes de tubos capilares de vários tamanhos. Num nível microscópico, o fluxo do fluido através dos tubos é visto como um fluxo laminar, representando o fluxo global no esqueleto do solo em nível macroscópico. Dessa forma, o fluxo pode ser descrito utilizando variáveis como velocidade média, gradiente, permeabilidade e raio hidráulico (CAI et al., 2014).

Modelos estatísticos. Estes modelos têm sido utilizados para determinar a função de condutividade a partir da curva característica de sucção. Essa abordagem é baseada no fato de que tanto a função de condutividade hidráulica quanto a curva característica de sucção dependem da distribuição granulométrica do solo em questão. Em geral, esses modelos apresentam melhor desempenho para solos com grãos grossos, pois suas características de retenção são obtidas de forma mais precisa pela teoria capilar. A utilização de tais modelos para solos com granulometria fina resulta em funções de condutividade imprecisas (FREDLUND et al., 1994; LU; LIKOS, 2004).

A Tabela 2 apresenta alguns modelos matemáticos para a obtenção da função de condutividade hidráulica, apresentados por Gerscovich e Guedes (2004). Algumas das equações utilizam um parâmetro de condutividade hidráulica relativa, que correlaciona o valor da condutividade hidráulica não saturada (k) com a condutividade hidráulica na condição saturada (k_{sat}), de acordo com a Equação (5):

$$K_{rel} = \frac{k}{k_{sat}} \quad (5)$$

Gerscovich e Guedes (2004) estudaram a aplicabilidade de tais modelos para a representação da função de condutividade hidráulica em solos brasileiros, utilizando resultados experimentais de dois solos diferentes. Os autores observaram grande variabilidade na qualidade do ajuste das curvas experimentais, sendo os menores erros encontrados nos modelos que se baseiam na variação da sucção. Para os solos em estudo, os modelos de Brooks e Corey (1968) e Arbhabhirama e Kridakorn (1968) forneceram melhores resultados.

TABELA 2 – MODELOS MATEMÁTICOS PARA DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO

Autores	Relações matemáticas	Variáveis
Gardner (1958)	$k = \frac{k_{sat}}{1 + a \left(\frac{\psi}{\rho_w g} \right)^n}$	a e n – Parâmetros de ajuste ρ_w – Densidade da água g – Aceleração da gravidade
Brooks e Corey (1968)	$k(\psi) = k_{sat} \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\eta$ $\psi > \psi_b$ $k(\psi) = k_{sat}$ $\psi \leq \psi_b$	ψ_b – Sucção de entrada de ar η – Parâmetro de ajuste

Arbhabhirama e Kridakorn (1968)	$k = \frac{k_{sat}}{\left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^{n'} + 1}$	ψ_b – Sucção de entrada de ar n' – Parâmetro de ajuste
Davidson et al. (1969)	$k = k_{sat} e^{\beta(\theta - \theta_s)}$	θ_s – Teor volumétrico de água na condição saturada β – Parâmetro de ajuste
Campbell (1974)	$k = k_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{2\beta+3}$	θ_s – Teor volumétrico de água na condição saturada β – Parâmetro de ajuste
Mualem (1976)	$K_{rel} = \frac{[1 - (a\psi)^{mn}(1 + (a\psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (a\psi)^n]^{m/2}}$ $\psi > 0$	m , n e a – Parâmetros de ajuste
Mualem e Dagan (1978)	$K_{rel} = S_e^X \left(\frac{\int_0^\theta \frac{d\theta}{\psi^{1+b}}}{\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta}{\psi^{1+b}}} \right)^2$	b – Fator de tortuosidade
Van Genuchten (1980)	$k(S_e) = k_{sat} S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2$	S_e – Grau de saturação efetivo m – Parâmetro de ajuste $l = 0,5$
Fredlund, Xing e Huang (1994)	$k = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_b)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy}$ $b = \ln(1000000)$	y – Variável fictícia da integração que representa o logaritmo da integração θ' - Derivada da equação para estimativa da curva de retenção proposta por Fredlund e Xing (1994)
Leong e Rahardjo (1997)	$k(\psi) = k_{sat} \left\{ \frac{1}{\left[\ln \left(\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a_f} \right)^{n_f} \right) \right]^{m_f}} \right\}^p$	p – Parâmetro de ajuste a_f , m_f e n_f – Parâmetros de ajuste da equação para estimativa da curva de retenção proposta por Fredlund e Xing (1994)
Vanapalli e Lobbezoo (2002)	$K_{rel} \approx 10^{(7,9 \log S^Y)}$ $\gamma = 14,08(I_p)^2 + 9,4(I_p) + 0,75$	I_p – Índice de plasticidade

FONTE: Adaptado de Fredlund et al. (1994) e Gerscovich e Guedes (2004).

2.1.3.1 Método do Perfil Instantâneo

O Método do Perfil Instantâneo permite a determinação da função de condutividade hidráulica do solo de forma direta com dados de campo utilizando o

processo de drenagem interna (MEURER, 2018). Uma vantagem da utilização desse método é a obtenção de medidas diretas no local de estudo, apresentando valores mais realísticos de condutividade hidráulica (GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

Para a aplicação do método, o solo é inundado até a saturação e a superfície é coberta para evitar a evaporação. O monitoramento da redistribuição de água por drenagem interna através de dados do conteúdo de água no solo e do potencial mátrico. A função de condutividade é obtida pela solução da equação de Richards (1931) na direção vertical (MEURER, 2018).

Um roteiro detalhado para a resolução do método foi apresentado por Portezan Filho (1997), baseado no método de Hillel (1972). Simplificadamente, o método apresentado por Portezan Filho (1997) considera a redistribuição de água (umidade volumétrica *versus* tempo) para uma profundidade constante, tendo como início a umidade volumétrica na saturação até o equilíbrio dinâmico. A relação umidade volumétrica por tempo tem um comportamento exponencial decrescente que pode ser linearizado utilizando função logarítmica. Outra consideração do método é de que o solo não apresenta heterogeneidade brusca em relação à profundidade e, portanto, há uma relação linear entre o potencial mátrico e a profundidade para os mesmos tempos analisados na redistribuição. O método permite calcular a condutividade hidráulica para diferentes tempos, relacionados a diferentes umidades, resultando num conjunto de dados de condutividade hidráulica e teor de umidade volumétrica, que permitem expressar a forma da função $k(\theta)$.

2.2 ANÁLISES DE FLUXO DE ÁGUA LÍQUIDA EM SOLOS NÃO SATURADOS

O regime que governa o fluxo de água em solos não saturados pode ser tanto permanente quanto transiente. Perfis de umidade e sucção que não variam com o tempo são assumidos em profundidades a partir da superfície, abaixo da zona ativa, em que variações de umidade e temperatura do ambiente não tenham mais influência sobre mudanças no teor volumétrico de água do solo. A mudança espacial e temporal do teor volumétrico de água em solos não saturados, entretanto, é comum tanto pelas mudanças ambientais a que o solo está submetido quanto pela capacidade de armazenamento de água que o solo possui. Análises de fluxo transiente, portanto, são de extrema importância para os problemas geotécnicos (LU; LIKOS, 2004).

Em análises de fluxo as parcelas do potencial total de água no solo, Equação (1), mais significativas são o potencial matricial e gravitacional, e a equação pode ser reescrita em termos de carga hidráulica (h) em que o potencial matricial é representado em termos de altura de coluna d'água (h_m) e o potencial gravitacional é representado a partir da altura do ponto em relação a um referencial (z) (PIZARRO, 2009):

$$h = h_m + z \quad (6)$$

A lei de Darcy é utilizada para descrever o fluxo de água (q_z) tanto em solos saturados quanto em solos não saturados, considerando a condutividade hidráulica (k) função da sucção ou da carga hidráulica. Considerando fluxo unidimensional, a lei de Darcy pode ser descrita como (LU; LIKOS, 2004):

$$q_z = -k(h_m) \frac{\partial h}{\partial z} \quad (7)$$

Substituindo a Equação (6) em (7), tem-se:

$$\begin{aligned} q_z &= -k(h_m) \frac{\partial (h_m + z)}{\partial z} \\ q_z &= -k(h_m) \left[\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right] \end{aligned} \quad (8)$$

A equação que governa o fluxo transiente em solos em condições isotérmicas pode ser derivada aplicando o princípio de conservação de massa. Assim, para um determinado volume elementar de solo, a taxa de perda ou ganho de água é conservativa e é igual ao fluxo líquido de entrada e saída. Pelo princípio da conservação de massa, obtém-se a Equação da Continuidade (LU; LIKOS, 2004):

$$-\frac{\partial q_z}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (9)$$

Combinando-se as Equações (8) e (9), tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[-k(h_m) \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (10)$$

Sabe-se que:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial h_m} \frac{\partial h_m}{\partial t} = C(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial t} \quad (11)$$

Em que $C(h_m)$ representa a capacidade hídrica específica [1/L] (PIZARRO, 2009). Dessa forma, a Equação (11) pode ser reescrita como:

$$C(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h_m) \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (12)$$

A Equação (12) é a Equação de Richards (RICHARDS, 1931), a qual governa o fluxo transiente unidirecional em solos não saturados. Soluções da equação de Richards com as condições iniciais e de contorno apropriadas fornecem o perfil de sucção no espaço e no tempo. São necessárias três funções características para sua solução: a função de condutividade hidráulica, a curva de retenção de água e a função da capacidade hídrica específica do solo. A solução numérica da equação de Richards é necessária para a maioria dos problemas práticos devido à complexidade das condições de contorno iniciais, geometria do fluxo, heterogeneidade do solo e a não linearidade das propriedades hidrológicas do solo. As abordagens de modelagem numéricas mais comuns são baseadas nos métodos das diferenças finitas ou elementos finitos (LU; LIKOS, 2004).

A Equação (12) pode ser escrita em termos de carga hidráulica (h_m), sendo referida como forma h, ou em termos de potencial matricial (ψ) e teor de umidade ($\theta = \theta(\psi)$), sendo referida como forma mista. A solução da equação pode ser feita através das duas formas, sendo que na forma h é possível incluir os efeitos da compressibilidade do fluido. Os componentes numéricos essenciais às soluções incluem aproximações espaciais e temporais utilizadas para realizar a transição entre uma condição inicial contínua para um sistema discreto, além do uso de técnicas de álgebra linear e não linear para resolução dos sistemas discretos resultantes (FARTHING; OGDEN, 2017).

Nas soluções baseadas na forma h , a não linearidade da capacidade hídrica específica $C(h_m)$ ocasiona elevados erros de conservação de massa para muitos exemplos de cálculo. Tais erros foram observados para diferentes métodos de iteração e tanto para o método dos elementos finitos quanto para o método das diferenças finitas, ainda que inferiores para o método dos elementos finitos. Uma solução proposta por Celia et al. (1990), que utiliza a forma mista da equação de Richards, tornou-se a abordagem numérica padrão (CELIA et al., 1990; FARTHING; OGDEN, 2017).

2.3 MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Nas camadas superficiais do terreno, um equilíbrio térmico e de umidade ocorre entre solo e atmosfera. Umidade é transferida do solo para a atmosfera por meio da evaporação, fenômeno que possui forte influência no perfil de sucção do solo. A avaliação do movimento de água ascendente é inicialmente quantificada em termos de potencial de evaporação. A evaporação real, entretanto, é de difícil quantificação devido à influência do estado de tensão do solo na superfície, principalmente pela parcela de sucção matricial. (FREDLUND et al., 2012).

Penman (1948) foi o primeiro pesquisador a combinar o balanço de energia e métodos aerodinâmicos para formular uma equação de potencial de evaporação, a qual se tornou de uso comum devido à simplicidade de aplicação. O potencial de evaporação pode ser determinado através da Equação (13) (TRAN, 2013).

$$PE = \frac{\Gamma Q_n + \eta E_a}{\Gamma + \eta} \quad (13)$$

Em que:

PE = Potencial de evaporação por unidade de tempo (mm/dia);

Γ = Tangente à curva de pressão de vapor de água no ponto temperatura média do ar;

Q_n = Radiação líquida (mm/dia);

η = Constante psicrométrica;

E_a = $f(u)(e_{sa} - e_a)$

e_{sa} = Pressão de vapor saturado na temperatura média do ar;

e_a = Pressão de vapor do ar acima da superfície de evaporação;

$f(u) = 0,35(1 + 0,146V)$

V = Velocidade do vento;

A radiação líquida pode ser estimada com base na formulação empírica proposta por Penman (1948), de acordo com a Equação (14):

$$Q_n = R_c(1 - r) - \tau T_a^4(0,56 - 0,092\sqrt{e_a}) \left(0,10 + \frac{0,90n}{M}\right) \quad (14)$$

Em que:

R_c = $0,95R_a(0,18 + 0,55 \frac{n}{M})$, radiação de ondas curtas medidas no local;

R_a = Radiação solar para uma atmosfera completamente transparente;

r = Coeficiente de reflexão;

τ = Constante de Stefan-Boltzmann;

T_a = Temperatura do ar;

$\frac{n}{M}$ = Razão entre horas de sol real/possível.

Posteriormente, Wilson (1990) propôs uma modificação à equação de Penman (1948), permitindo o cálculo da evaporação real. A equação proposta por Wilson (1990) também é baseada na combinação do balanço energético e transferência de massa na superfície do solo. O autor incluiu na equação a umidade relativa do solo na superfície, sendo possível, assim, estimar a taxa de evaporação em superfícies não saturadas. A Equação (15) permite o cálculo da evaporação real proposta por Wilson (1990) (TRAN, 2013):

$$AE = \frac{\Gamma Q_n + \eta E_a}{\Gamma + \eta A} \quad (15)$$

Em que:

AE = Taxa de evaporação real (mm/dia);

Γ = Tangente à curva de pressão de vapor de água no ponto temperatura média do ar;

Q_n = Radiação líquida (mm/dia);

η = Constante psiconométrica (aproximadamente 0,5 mmHg/°C);

E_a = $f(u)e_a(B - A)$

B = Inverso da umidade relativa do ar;

A = Inverso da umidade relativa do solo na superfície.

2.4 MODELOS FÍSICOS E SIMULADORES DE PRECIPITAÇÃO

A previsão do comportamento de uma estrutura ou de um sistema natural pode ser realizada de três maneiras: método analítico, empírico ou modelos físicos. O método analítico consiste na utilização de uma lei geral que permita efetuar a previsão de valores de uma grandeza em função dos valores de outras grandezas. O método empírico consiste em construir o sistema de maneira que as características essenciais não se alterarem e se preveja o comportamento futuro a partir de observações apoiadas nessa hipótese. Por fim, os modelos físicos consistem em analisar observações efetuadas em outro sistema, que se comporte de maneira semelhante ao sistema que se deseja prever, porém com dimensões reduzidas (MOTTA, 1972).

Modelos físicos, portanto, são realizados a fim de estudar aspectos particulares de um protótipo. Experimentos de larga escala são um exemplo de modelo físico em que todos os parâmetros do protótipo sendo estudado são reproduzidos. Muitos modelos físicos, entretanto, são construídos em escala muito menor que o protótipo em função da necessidade de se obter informações a respeito de padrões de resposta mais rapidamente e com controle e detalhes mais precisos do que seria possível em um experimento de larga escala. Se o modelo não é construído em larga escala, portanto, é necessário entender como as observações podem ser extrapoladas para o protótipo. Assim, é necessário que sejam formuladas condições relativas à geometria, materiais e forças presentes entre modelo físico e protótipo (MOTTA, 1972; WOOD et al., 2002). Em relação ao modelo físico desta pesquisa, não é necessário que se faça uma análise dimensional em relação às condições geométricas da caixa utilizada, que será detalhadamente descrita em 3.3, e de forças atuantes nela, pois as variáveis envolvidas no processo de infiltração e, conseqüentemente, na variação da sucção no solo estudado não dependem de tais fatores, apenas das características hidráulicas do solo. As condições do material, por outro lado, são fundamentais e para que se obtivesse uma análise mais realística do

comportamento do solo, o ideal seria o uso de uma amostra indeformada nas simulações.

Para avaliar a influência da precipitação no perfil de sucção foi necessária a simulação de chuva controlada. Simuladores de chuva têm sido comumente utilizados em estudos envolvendo infiltração e escoamento da água no solo, tanto no âmbito da geotecnia quanto no âmbito da agricultura e, seus principais componentes são um gerador de gota e um sistema de alimentação de água (MORIN et al., 1967; ABUDI et al., 2012; WU et al., 2015). Os sistemas devem garantir a reprodução realista do tamanho e energia da gota, aplicação quase contínua e uniforme e a possibilidade de aplicação de chuvas com variação de intensidade e tempo. Gotas de maiores dimensões apresentam velocidade terminal superior, aumentando, assim, sua energia de impacto na superfície do solo, fator de grande influência nos estudos envolvendo a erosão do solo (ABUDI et al., 2012).

Os simuladores de precipitação são classificados em duas categorias amplas: (a) simuladores de chuva de aspersores não pressurizados e (b) simuladores de chuva de aspersores pressurizados (ABUDI et al., 2012; AKSOY et al., 2012; GRISMER, 2012). Nos simuladores não pressurizados o equipamento gerador de gotas está localizado a uma determinada altura, cerca de 10 a 12 m, ocasionando o caimento das gotas de chuva sob o efeito da força gravitacional, enquanto os simuladores pressurizados podem produzir condições reais de precipitação a uma altura de queda muito menor (AKSOY et al., 2012).

A distribuição da precipitação pode ser determinada conforme realizado por Abudi et al. (2012) utilizando recipientes plásticos distribuídos uniformemente sobre a área de aspersão e aplicando o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (C_u), de acordo com a Equação (16).

$$C_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |R_i - M|}{nM} \quad (16)$$

Em que R_i é a quantidade de água em cada recipiente, M é a média da quantidade de água em todos os recipientes e n é o número de recipiente. Para uma distribuição satisfatória, C_u deve ser superior a 0,8.

Morin et al. (1967) e Abudi et al. (2012) desenvolveram simuladores de chuva por aspersão utilizando modelos de aspersores com padrão de distribuição em um

cone sólido com uma área de impacto circular, os quais apresentaram resultados satisfatórios. O trabalho de Abudi et al. (2012) estudou a aplicabilidade de um simulador de chuva utilizando aspersor da classe FullJet para avaliação de precipitações que induzem a soil crusting, fenômeno em que a velocidade e energia cinética da gota possuem forte influência e o modelo atendeu aos requisitos necessários tanto em termos de velocidade quanto de energia cinética.

Mhaske et al. (2019) desenvolveram um simulador de fácil aplicabilidade para estudos de erosão do solo em laboratório. O simulador é formado por um sistema de abastecimento de água, com um reservatório e uma bomba de pressurização, acoplado a um único aspersor central. Para controlar a vazão de saída do aspersor foram utilizadas duas válvulas, uma que desvia o excesso de água pressurizada para o reservatório novamente e outra que controla o volume de água disponível no aspersor. Um medidor de vazão e um manômetro foram utilizados para controlar a pressão e vazão no sistema. O simulador desenvolvido pelos autores abrange uma área de 3 m², dos quais 0,5 m² foram utilizados para o experimento em questão. O coeficiente de uniformidade nessa área variou de 81% a 88%.

Em relação à intensidade de precipitação, os simuladores permitem avaliar os fenômenos de estudo frente a intensidades e durações controladas (ABUDI et al., 2012). O sistema desenvolvido por Abudi et al. (2012) permite simular precipitações de até 130 mm/h de intensidade, sendo função do tempo de aplicação da vazão constante de 0,035 mm/s do sistema. Lora et al. (2016) desenvolveram um simulador para aplicação em estudos envolvendo deslizamentos desencadeados por chuvas de alta intensidade utilizando aspersores de jato plano, cujas intensidades de precipitação possíveis variam de 50 a 150 mm/h. Para o simulador desenvolvido por Mhaske et al. (2019) quatro intensidades de precipitação (65, 93, 112 e 148 mm/h) foram possíveis de simular através do uso de quatro aspersores de modelos diferentes.

2.5 MONITORAMENTO DA ÁGUA NO SOLO

O monitoramento através da instrumentação tem como principal objetivo a obtenção de informações que aumentem o entendimento do comportamento de um maciço. Na instrumentação de encostas, em relação aos aspectos hidrogeológicos, é necessário avaliar as variações nas tensões atuantes nas camadas não saturadas de

solo e variações do lençol freático, as quais ocasionam o desenvolvimento de poropressões positivas no solo (SESTREM, 2012).

2.5.1 Piezômetros

Os piezômetros são instrumentos utilizados para o monitoramento da poropressão positiva no solo. Para a medição da pressão em uma determinada profundidade, o instrumento é instalado em um furo, o qual é preenchido com areia na cota de interesse, seguido de camada de bentonita e, no restante do furo, o preenchimento é feito com mistura de bentonita e cimento. A bentonita atua como uma cobertura impermeável, impedindo a passagem de água e, portanto, só é possível a entrada de água no instrumento pela camada permeável de areia na cota de interesse (SESTREM, 2012). De acordo com Silveira (2006), dentre os modelos mais comuns de piezômetros tem-se: de tubo aberto, pneumáticos, hidráulicos, de resistência elétrica, e de corda vibrante, que é utilizado nesse trabalho.

No piezômetro de corda vibrante, os principais componentes são uma pedra porosa e um diafragma interno. A deflexão desse diafragma é medida através de um fio tensionado instalado perpendicularmente ao seu plano. As deflexões, que são ocasionadas pelo equilíbrio entre a pressão no solo e no interior do instrumento, provocam alteração na tensão do fio e geram vibração, a qual é medida por uma bobina. Esse modelo do instrumento é muito utilizado devido a sua precisão e alta sensibilidade (SILVEIRA, 2006).

2.5.2 Sensores de umidade

O monitoramento da variação da umidade no solo é necessário para projetos geotécnicos e pesquisas, pois as propriedades e comportamento do solo podem variar com o teor de umidade. Enquanto o monitoramento em longo prazo da sucção pode ser difícil e não confiável, a medição do teor de umidade é relativamente fácil (KODIKARA et al., 2013). Medidas do teor de água no solo, portanto, desempenham um papel importante no monitoramento geotécnico, fornecendo uma referência da quantidade de água presente no solo, além de permitirem confirmar a validade da

curva de retenção de água no campo, quando monitoradas junto à sucção (FREDLUND et al., 2012).

Há três maneiras de se obter o teor de água no solo: a medição simples e direta, através da retirada de uma amostra de solo em campo; técnicas radiológicas, através de sondas de nêutrons e radiação gama; e através do uso de propriedades dielétricas do solo para a determinação do teor de água. A constante dielétrica, ou permissividade, de um material é definida como a relação entre a quantidade de energia elétrica armazenada no material quando uma tensão é aplicada e a quantidade de energia armazenada no vácuo. O contraste entre as constantes dielétricas do ar, água e solo são a base para a determinação do teor volumétrico de água no solo. A medida da constante dielétrica de um solo permite a comparação entre o valor para o estado seco ou saturado, permitindo a determinação do teor volumétrico de água (FREDLUND et al., 2012).

O instrumento para o monitoramento do teor volumétrico de água no solo a ser utilizado nessa pesquisa é o sensor de umidade EC-5 (METER Group Inc., USA), que utiliza o princípio da determinação da constante dielétrica do meio para obtenção do teor volumétrico de água. Esse mesmo modelo foi utilizado em um estudo realizado por Li et al. (2005) para o monitoramento em tempo real do teor de umidade em um solo frente a eventos de precipitação e apresentou resultados satisfatórios. Bogaen et al. (2010) também utilizaram o sensor num estudo que investigou o potencial da tecnologia de rede de sensores wireless para o monitoramento da variabilidade da curva de retenção de água em campo e os resultados mostraram que os sensores forneceram uma estimativa mais precisa da variabilidade da curva de retenção em comparação com dados descontínuos de campanhas de medidas de campo.

2.6 INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO PERFIL DE SUCÇÃO E DESLIZAMENTOS

A distribuição vertical da sucção matricial em depósitos naturais de solos não saturados depende de diversos fatores, entre eles as propriedades hidrológicas do solo dadas pela curva de retenção de água e pela função de permeabilidade, o grau de saturação em que o solo se encontra, condições ambientais que controlam os fluxos de infiltração e evapotranspiração e limites geométricos ou condições de drenagem, como a profundidade do lençol freático (LU; LIKOS, 2004).

A zona não saturada pode ser conceitualmente dividida em duas regiões, de acordo com Lu e Likos (2004): uma zona de estado sazonalmente instável e uma zona de estado estacionário. A zona sazonalmente instável localiza-se próxima à superfície e é altamente controlada por fatores ambientais, tais como precipitação, evapotranspiração, umidade, temperatura e fluxo de ar. A profundidade dessa zona varia significativamente com o local e condições ambientais e geológicas, além de oscilar com o tempo. Abaixo dela encontra-se a zona de estado estacionário, em que a sucção é relativamente independente do tempo, controlada por fatores como tipo de solo, taxa de infiltração, topografia e profundidade do lençol freático. Os perfis de sucção e como eles são afetados pela infiltração e evapotranspiração tem sido um importante objeto de estudo para diversos autores por sua estreita relação com os deslizamentos induzidos por chuva.

2.6.1 Estudos envolvendo modelos físicos

A avaliação de deslizamentos induzidos por chuva foi estudada por Wu et al. (2015) em laboratório. Os autores realizaram uma simulação de precipitação em solo arenoso com diferentes inclinações, monitorando o teor de umidade e a sucção matricial. O modelo físico consistiu em uma caixa em vidro temperado com reforços metálicos nas dimensões de 2,00 x 0,60 m, com 0,80 m de altura, instrumentada com sensores de poropressão capazes de ler intervalos de pressão de -100 a 50 kPa e com sensores de umidade. Para a simulação de precipitação, utilizou-se um sistema de fornecimento de água, um sistema de aspersores e um controlador, permitindo a simulação de chuvas nas intensidades de 48 e 168 mm/h. O solo utilizado foi classificado como areia e a preparação na caixa foi realizada a fim de garantir a uniformidade. A compactação foi executada em camadas de 5 cm com solo em uma umidade de 8%, de modo a se obter uma massa específica aparente seca de 1,5 g/cm³, e, em cada camada, amostras em anéis foram retiradas para verificação da umidade e massa específica real. O propósito do trabalho foi estudar o processo de infiltração e os mecanismos de ruptura envolvidos, simulando as duas intensidades de chuva diferentes e diferentes valores de sucção inicial, com os testes sendo levados até a ruptura do modelo. Além disso, simulações numéricas foram realizadas em modelos com as mesmas características dos modelos físicos.

Os autores concluíram que chuvas de baixa intensidade e longa duração induzem a superfícies de ruptura mais profunda e, sendo assim, deslizamentos de maior escala e que a frente de umedecimento se desenvolve mais rapidamente se o ângulo de inclinação do declive é menor. Além disso, nos testes realizados com maiores valores de sucção inicial, e consequentes menores valores de condutividade hidráulica, observou-se que a água não infiltra nas camadas mais profundas com facilidade, formando uma zona saturada transiente na região mais rasa do declive (WU et al., 2015).

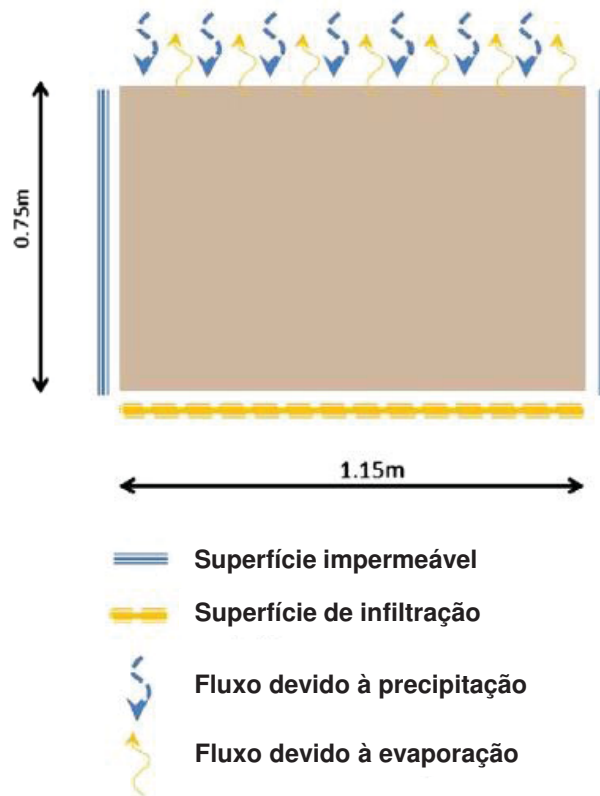
Ahmadi-Adli et al. (2017) também realizaram um experimento de laboratório para estudar infiltração da água da chuva em declive e sua correlação com deslizamentos, a fim de determinar um limiar pluviométrico do tipo Intensidade-Duração. O modelo físico utilizado consistiu em uma caixa com duas faces em vidro temperado nas dimensões de 1,87 x 0,48 m, com 0,70 m de altura, preenchido com areia fina compactada a baixa densidade. A compactação foi realizada em camadas de 5 cm com auxílio de uma placa de aço colocada sobre a camada e solo a uma umidade de 1,5%, a fim de se obter as massas específicas aparentes secas de 1,20 e 1,27 g/cm³. A superfície do solo foi inclinada a um ângulo de 56,5° e o modelo foi instrumentado com tensiômetros, transdutores de poropressão e inclinômetros. A precipitação foi simulada com aspersores e as intensidades obtidas foram de 18 a 63,5 mm/h. Dentre as conclusões obtidas com o experimento, tem-se que as superfícies de ruptura foram, em geral, coincidentes com a frente de umedecimento ou muito próximas delas e que na maior parte dos experimentos as deformações levaram à ruptura de forma abrupta. Em relação ao limiar pluviométrico, os autores concluíram que há uma intensidade mínima de precipitação, de 15 mm/h para o solo menos denso e 20 mm/h para o solo mais denso, abaixo da qual deslizamentos não são desencadeados, e que para o solo compactado a uma maior densidade, a curva do limiar se move para evento de chuva de maior duração.

Um estudo experimental dos mecanismos de ruptura de um declive de solo argiloso, utilizando amostras remoldadas, sob a ocorrência de chuvas intensas foi realizado por Elkamhawy et al. (2018). Os autores idealizaram um modelo físico com a simulação de precipitação em um declive inclinado a 50° executado com solo argiloso com uma camada fraca de 2 cm de solo arenoso inclinada em 30°, monitorando poropressão e tensões na massa de solo. Além disso, realizaram uma modelagem numérica da situação. Os resultados permitiram observar que, por se

tratar de solo não saturado, à medida que a água precipitada infiltrou no solo, a sucção matricial diminuiu e o processo de instabilidade ocorreu quando a frente de umedecimento atingiu a potencial superfície de ruptura. Além disso, a infiltração ocasionou o aumento do nível d'água, gerando um escoamento do ponto mais alto do declive para o mais baixo, e, quando atingiu a camada de maior condutividade hidráulica, o fenômeno de piping foi observado na porção inferior do declive. As medidas de poropressão e tensões na massa de solo aumentaram durante a simulação de chuva.

Um modelo físico foi realizado por Rianna et al. (2014) para permitir a interpretação do comportamento hidrológico de uma camada de silte proveniente de piroclasto sujeita às condições atmosféricas reais. Um tanque nas dimensões 1,15 x 1,15 m com 0,75 m de altura foi preenchido com 1 m³ de solo, moldado com superfície horizontal. O solo utilizado foi coletado em uma região com ocorrência de deslizamentos e foi disposto no tanque de modo a manter a porosidade de campo (70% ou mais), após seco e desagregado, com auxílio de um funil. As condições de contorno no modelo físico foram: laterais impermeáveis, superfície superior com fluxos de entrada e saída de água em função da precipitação e evaporação e superfície inferior com drenagem livre, através de furos na base do tanque e aplicação de geotêxtil. O modelo foi densamente instrumentado para monitorar aspectos ambientais, tais como precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, vento, pressão do ar, radiação solar entrante e radiação líquida. Em relação ao solo, o monitoramento levou em conta a variação de peso com uso de células de carga, fluxo de calor, temperatura, teor volumétrico de água, através de sonda TDR, e sucção mátrica com tensiômetros de reservatório injetável. O tempo de monitoramento abrangeu dois anos hidrológicos, de julho de 2010 a setembro de 2012. A Figura 9 apresenta um esquema do modelo físico realizado.

FIGURA 9 – MODELO FÍSICO REALIZADO POR RIANNA ET AL. (2014)



FONTE: Adaptado de Rianna et al. (2014).

Em relação à instrumentação, os valores de sucção e teor volumétrico de água registrados foram comparados aos resultados experimentais obtidos em laboratório, mostrando que os dados providos do modelo físico foram consistentes com os obtidos em laboratório. Além disso, o uso da célula de carga permitiu quantificar variações do peso da camada de solo ocasionadas pela absorção ou perda de água devido aos fenômenos de precipitação e evaporação (RIANNA et al., 2014).

Ao longo de todo o período, os dados mostraram concordância entre as variações de sucção e armazenamento de água. Durante períodos chuvosos, elevados valores de armazenamento de água e baixos valores de sucção foram registrados, sendo observado o oposto para períodos secos. Essa concordância possibilitou descrever e interpretar o comportamento hidrológico do solo em estudo através da definição de três limites de armazenamento de água: um para o período seco, outro para o período chuvoso e um terceiro relacionado à possibilidade de desencadear deslizamentos. O primeiro limite está relacionado ao nível em que o volume de água armazenada pelo solo se estabiliza em períodos secos. Nele, um elevado volume de água é necessário para modificar a poropressão. Aliado a isso,

tem-se baixos valores de condutividade hidráulica para o solo no estado seco, o que retarda o processo de equilíbrio hidráulico, tornando longo tempo para que a infiltração atinja camadas mais profundas. O limite para o período chuvoso é o limite superior em que o volume de armazenamento de água se estabiliza após longos períodos com precipitação. Nesse limite observou-se o contrário, os baixos volumes de água necessários para ocasionar mudanças na poropressão aliados à elevada condutividade hidráulica do solo, tornam o processo de equilíbrio hidráulico mais rápido e a infiltração atinge camadas mais profundas em menos tempo. O terceiro limite está relacionado à máxima capacidade de armazenamento de água, correspondente a uma condição saturada e valores de sucção nulos (RIANNA et al., 2014). Os autores concluíram, para o contexto do local de estudo, que um evento isolado não é capaz de induzir deslizamentos e que um deslizamento não pode ser desencadeado por um período chuvoso longo sem a ocorrência de um evento significativo, pois este é necessário para que se atinja o terceiro limite de armazenamento de água.

2.6.2 Estudos envolvendo experimentos de campo e modelagem numérica

Kim et al. (2017) propuseram uma metodologia de análise integrada para avaliação de deslizamento induzido por chuva que incorpora a sucção matricial em campo para a determinação de parâmetros hidráulicos de solos não saturados. Os autores estudaram uma região anteriormente afetada por um deslizamento de larga escala, utilizando testes de laboratório, monitoramento da sucção em campo com auxílio tensiômetros, investigação de imagens aéreas, análise de dados de precipitação e da vegetação local, além de análises de fluxo transiente e de estabilidade em software apropriado. Verificou-se que as mudanças nos valores de sucção matricial ocasionam variações no teor de umidade do solo e na condutividade hidráulica, sendo a principal variável em análises de suscetibilidade a deslizamentos. Essa variação de sucção é influenciada principalmente pela altura de infiltração, que por sua vez é dependente da sucção inicial. Isso torna as análises de deslizamentos induzidos por chuvas em solos não saturados difíceis de conduzir (KIM et al., 2017).

Li et al. (2005) conduziram um experimento de campo em grande escala para avaliar a variação da sucção matricial e da umidade do solo em decorrência da precipitação. A encosta estudada, formada por solo residual, foi instrumentada com

tensiômetros, piezômetros e sensores de umidade. Os autores propuseram um método para análise da infiltração baseado na variação do teor volumétrico de água que resultou em uma taxa de infiltração de aproximadamente 70% para a encosta estudada. Além disso, observou-se que a frente de umedecimento foi diferente para cada padrão de chuva, atingindo uma profundidade máxima de 3 m, e que um lençol suspenso se formou nos primeiros 2 m de profundidade durante a chuva mais forte do período monitorado.

Análises de processos de infiltração e variação da sucção podem também ser realizadas através de métodos numéricos. Galeandro et al. (2014) utilizaram um modelo de dupla permeabilidade, que simula a infiltração da água em um solo fissurado com capacidade dilatante, sobrepondo um solo com permeabilidade superior, para avaliar a influência desses fatores no desencadeamento de deslizamentos. Foram simuladas chuvas de 20 mm e 50 mm, com diferentes intensidades e durações. Os resultados mostraram que para precipitações de alta intensidade, o fluxo vertical através das fissuras rapidamente atinge profundidades significativas, e a expansão do solo ocorre uniformemente, mantendo as fissuras quase paralelas. Já para precipitações de baixa intensidade, a infiltração ocorre em menores profundidades, de 30 cm a 50 cm, concentrando a expansão do solo na camada superficial e induzindo ao fechamento das fissuras. A aplicação do modelo mostrou que para chuvas severas a barreira capilar é quebrada nas fraturas devido ao aumento rápido da frente de umedecimento. Além disso, nas análises de estabilidade realizadas observou-se que as simulações com chuvas de baixa intensidade e longa duração possuem maior tendência a desencadear processos de instabilidade nas camadas superficiais devido à drástica redução da sucção nessas camadas.

A influência dos padrões de comportamento da chuva na dissipação da poropressão negativa, e a consequente geração de movimentos de massa, foi estudada por Tsai e Wang (2011). Os autores adotaram, nas análises, quatro padrões de precipitação: uniforme, de intensidade baixa e constante; avançado, com alta intensidade inicial e diminuição ao longo do tempo; atrasado, com baixa intensidade inicial e aumento ao longo do tempo; e intermediário, com um pico de intensidade no tempo médio. Os autores concluíram que os padrões de comportamento da chuva influenciam não apenas a ocorrência ou não de deslizamento, mas também a profundidade de ruptura e o tempo de ocorrência, além disso, foi observado que há

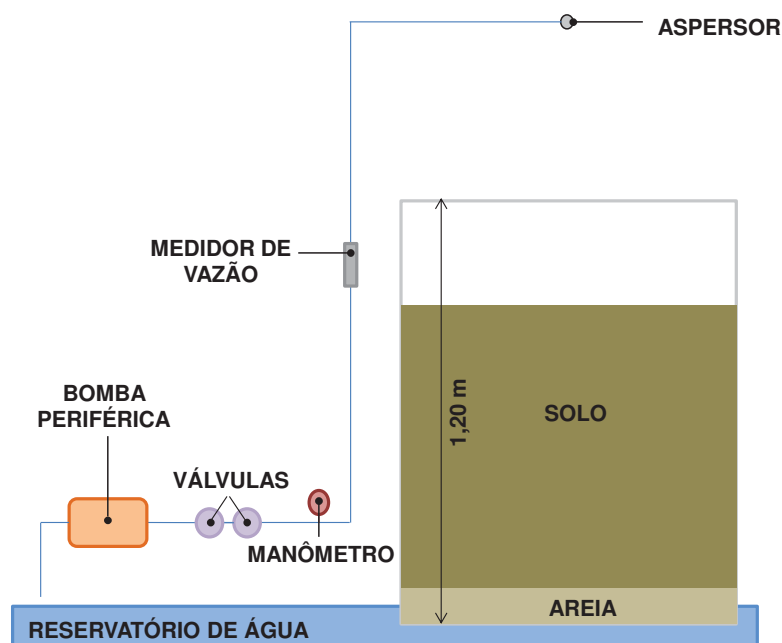
um mesmo acumulado mínimo de precipitação capaz de desencadear um movimento, assim como observado por Ahmadi-Adli, et al. (2017), que independe do padrão de precipitação.

3 CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO FÍSICO

A metodologia que permeou o trabalho envolveu a preparação e o desenvolvimento de um modelo físico em que a umidade do solo e a poropressão foram monitoradas através de instrumentos geotécnicos, na presença de diferentes intensidades de precipitação simulada de forma artificial e controlada. O solo utilizado teve características físicas e hidrológicas conhecidas através da execução de ensaios de laboratório. Os resultados de instrumentação foram comparados com simulações numéricas com auxílio do módulo SVFLUX™GT do software SVOFFICE™5 (SoilVision, Canadá), que permite a modelagem da água subterrânea através do Método dos Elementos Finitos (MEF).

O modelo consiste em uma caixa em acrílico com reforço metálico nas dimensões 93,00 x 93,00 cm de base com 120,00 cm de altura, preenchida com solo compactado em camadas de 5 cm. Para a simulação de chuva, um bico aspersor, uma bomba d'água periférica e um registro regulador de vazão foram utilizados, além de um medidor de vazão e um manômetro para o controle da precipitação simulada. Os instrumentos foram instalados no solo em diferentes profundidades, com sistema de aquisição de dados automática. A Figura 10 apresenta um esquema geral do modelo.

FIGURA 10 – ESQUEMA GERAL DO MODELO FÍSICO



FONTE: A autora (2020).

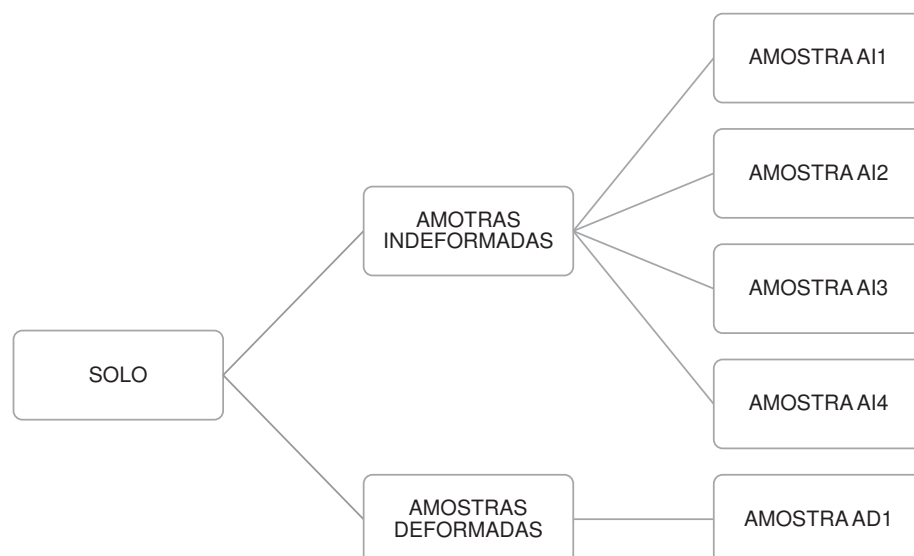
3.1 PLANEJAMENTO E PREPARAÇÃO DA PESQUISA

Este capítulo tem por objetivo apresentar as principais etapas de planejamento da pesquisa e resumir, de forma a facilitar o entendimento do trabalho, quais foram as amostras de solo coletadas, os ensaios realizados com o solo e as simulações de precipitação.

O desenvolvimento da pesquisa iniciou com o processo de concepção e aquisição dos componentes necessários em agosto de 2018. Desde o processo de levantamento dos materiais e liberação orçamentária para aquisição dentro da Universidade, até o recebimento de todos os componentes integrantes, decorreu-se mais de um ano. A Figura 12 apresenta uma linha do tempo indicando as principais etapas do desenvolvimento da pesquisa do início da aquisição de materiais até o fim das simulações de precipitação.

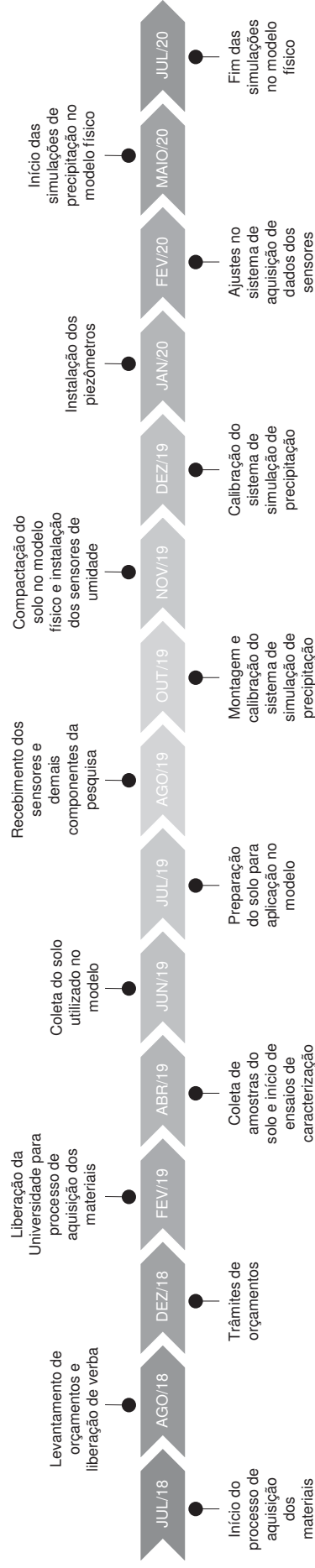
Em relação às amostras de solo coletadas, o fluxograma apresentado na Figura 11 indica os tipos e quantidades de amostras coletadas, além da nomenclatura utilizada na pesquisa, para facilitar o entendimento. As amostras indeformadas foram coletadas em anéis metálicos para determinação de parâmetros do solo natural. A amostra deformada foi coletada para realização de ensaios de caracterização, curva de retenção de água e permeabilidade, além da utilização no modelo físico.

FIGURA 11 – FLUXOGRAMA DE AMOSTRAS DE SOLO COLETADAS



Fonte: A autora (2020).

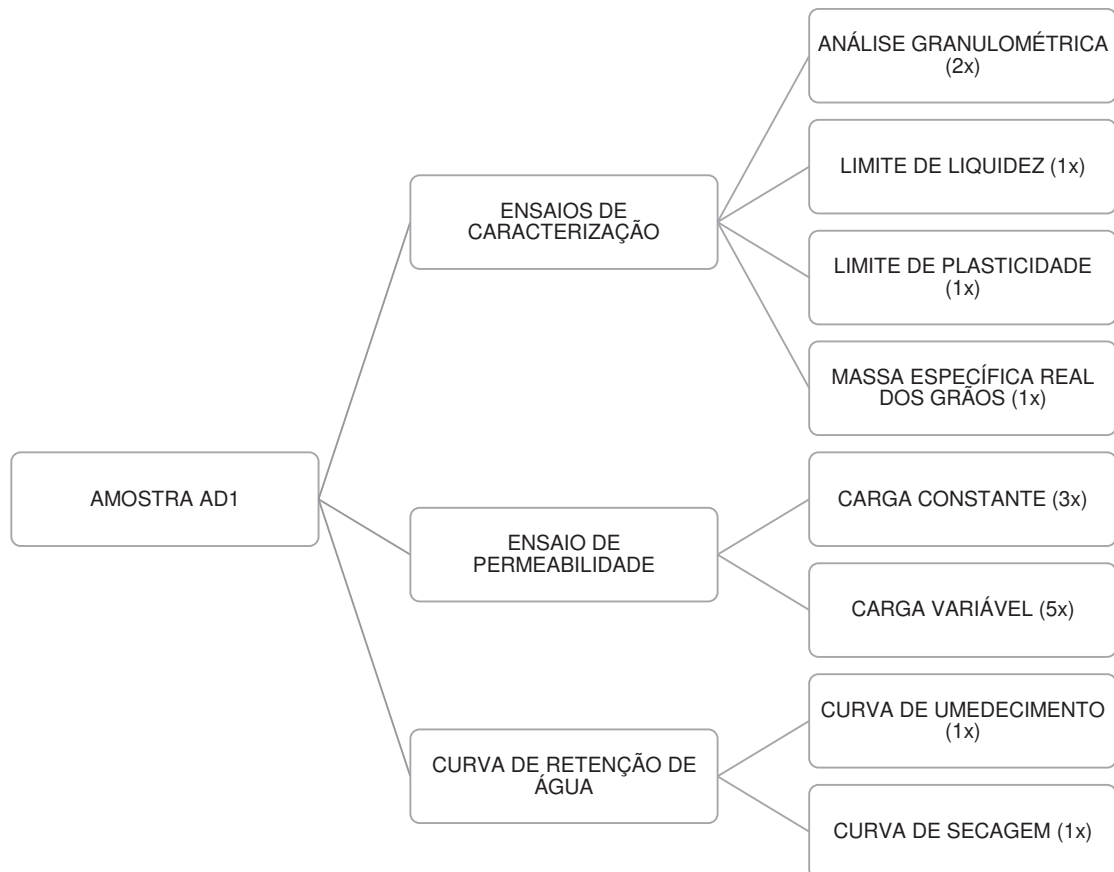
FIGURA 12 – LINHA DO TEMPO DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA



Fonte: A autora (2020).

Em relação aos ensaios realizados com o solo deformado (amostra AD1), a Figura 13 apresenta um fluxograma resumo dos tipos e quantidades de ensaio. Foram realizados ensaios de caracterização, permeabilidade e determinação da curva de retenção de água.

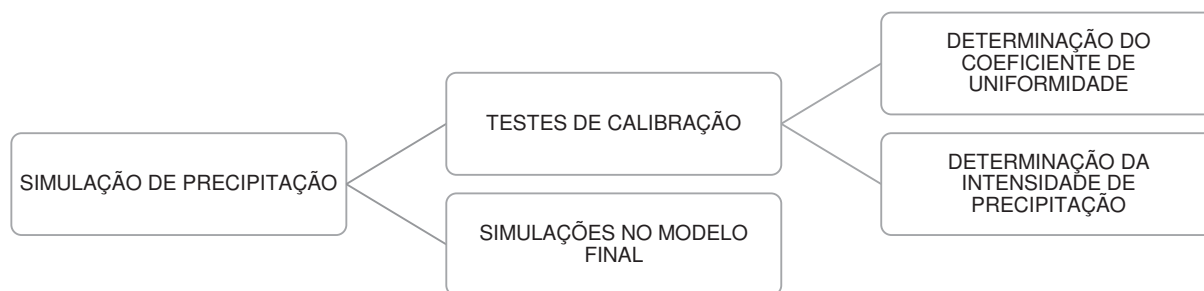
FIGURA 13 – FLUXOGRAMA DE ENSAIOS REALIZADOS NA AMOSTRA DEFORMADA



Fonte: A autora (2020).

As simulações de precipitação foram realizadas em duas etapas: testes de calibração, para determinação do coeficiente de uniformidade e determinação da intensidade de precipitação simulada, e as simulações no modelo final, base dos resultados da pesquisa. A Figura 14 apresenta um esquema das simulações de precipitação realizadas.

FIGURA 14 – FLUXOGRAMA DAS SIMULAÇÕES DE PRECIPITAÇÃO



Fonte: A autora (2020).

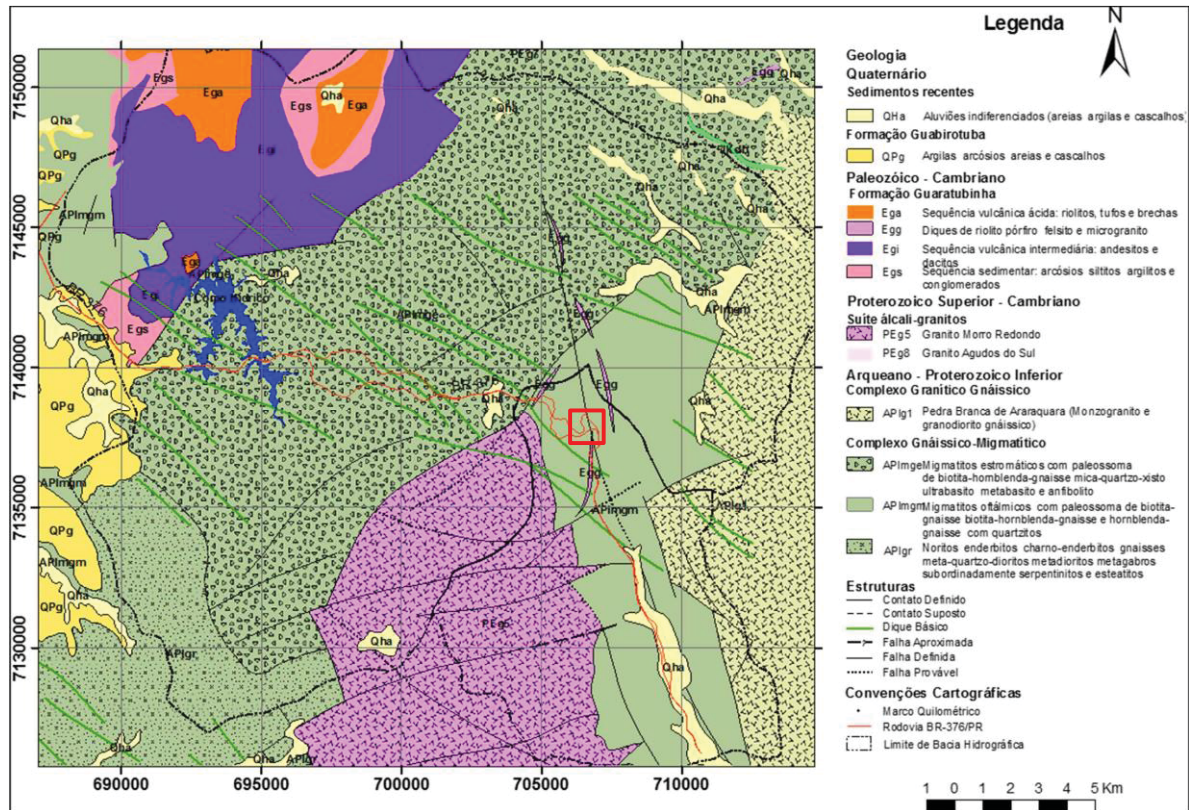
3.2 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A amostra deformada de solo AD1 foi coletada em um trecho da BR-376/PR sentido Sul próximo ao quilômetro 667. Ao todo, foram coletados 1,2 m³ de material caracterizado como solo residual de gnaiss migmatito.

Próximo ao local de coleta, alguns trechos foram estudados em outras pesquisas. Em um deles, uma intensa campanha de investigação geotécnica foi realizada e resultou em análises que mostraram instabilidade no local (ALS, 2019); no outro, amostras deformadas e indeformadas foram coletadas para realização de ensaios de laboratório (VICTORINO, 2015; GONZÁLEZ, 2017; MATOS, 2017). A Figura 15 apresenta o mapa geológico da área de estudo e a Figura 16 apresenta um mapa com o trecho em que o solo foi coletado para esta pesquisa e os outros dois pontos já estudados.

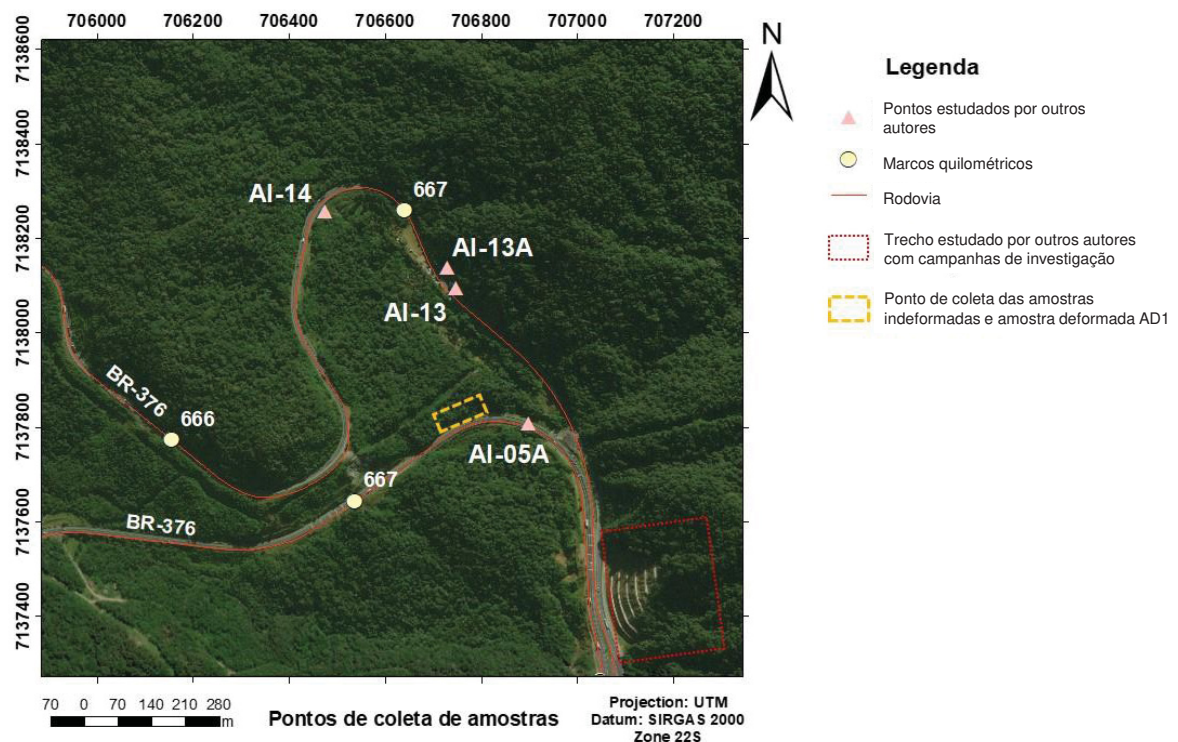
A coleta do solo deformado foi realizada a partir de um material escavado e, portanto, na presença de agregados com grandes dimensões (pedregulhos e pedras-de-mão). A fim de uniformizar o solo para utilização no modelo e na realização dos ensaios indicados anteriormente, foi feita a secagem do material ao ar, o destorroamento e o peneiramento em uma peneira com abertura 4,76 mm. A Figura 17 apresenta o solo no estado em que foi coletado, o processo de secagem e o material resultante do peneiramento. No solo já uniformizado foram realizados ensaios a fim de conhecer o material disposto no modelo e definir parâmetros fundamentais nas análises dos resultados.

FIGURA 15 – MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO



Fonte: Adaptado de González (2017).

FIGURA 16 – MAPA COM LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DE AMOSTRAS



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 17 – PREPARAÇÃO DO SOLO: (A) SOLO COLETADO, (B) PROCESSO DE SECAGEM E (C) SOLO UNIFORMIZADO



Fonte: A autora (2019).

3.2.1 Ensaios de caracterização

Os ensaios de caracterização envolveram análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade e massa específica real dos grãos. Todos os ensaios foram realizados de acordo com as orientações normativas correspondentes e o solo foi preparado de acordo com o disposto pela NBR 6457 (ABNT, 2016a).

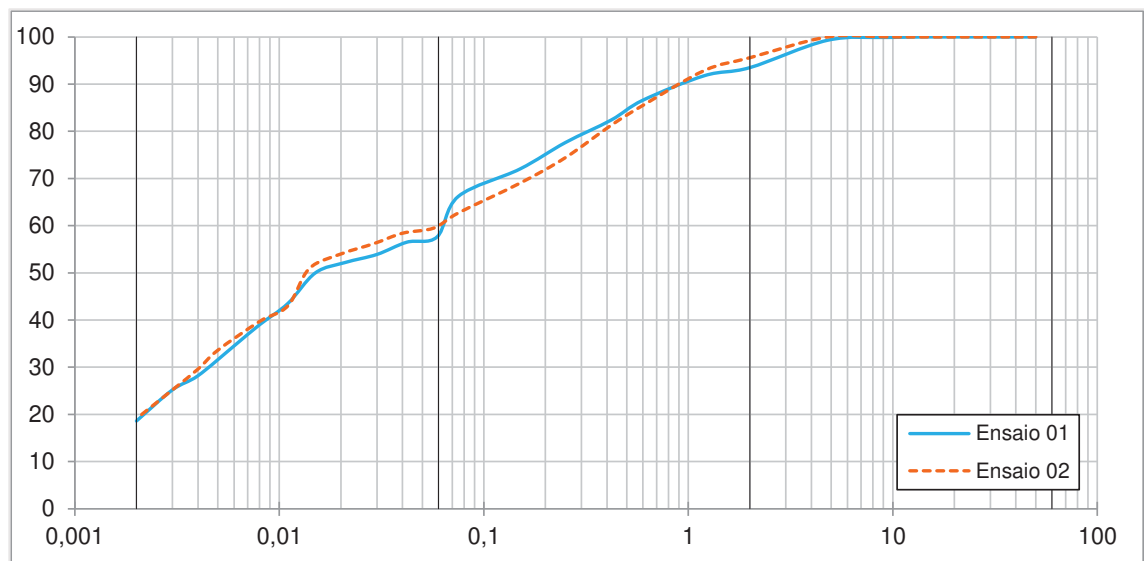
A análise granulométrica foi realizada através dos métodos de peneiramento e sedimentação, seguindo a norma brasileira NBR 7181 (ABNT, 2016d). O ensaio permite a determinação dos diâmetros das partículas e sua distribuição na amostra de solo, sendo que partículas de granulometria mais grossa (pedregulhos e areias) têm seus diâmetros determinados através do peneiramento e partículas mais finas (siltes e argilas) através da sedimentação, conforme Figura 18. A Figura 19 apresenta a curva de distribuição granulométrica resultante de dois ensaios realizados. As duas curvas apresentaram comportamento muito similar, com percentuais de silte e de areia muito semelhantes e parcela significativa de argila. O solo é caracterizado como um Silte Areno-Argiloso, o que ocasiona um comportamento heterogêneo em relação aos parâmetros de fluxo em solos não saturados (curva de retenção de água e permeabilidade).

FIGURA 18 – ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO E PENEIRAMENTO



FONTE: A autora (2020).

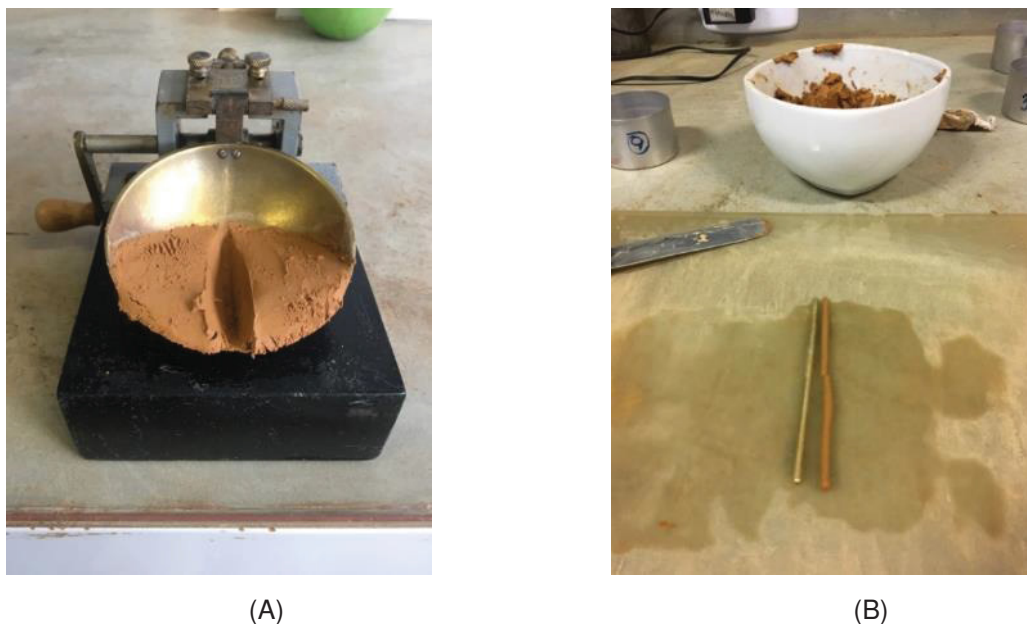
FIGURA 19 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO ESTUDADO



FONTE: A autora (2020).

Os índices de consistência foram determinados através dos ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade. A fração fina de um solo é responsável por conferir sua plasticidade, a qual é inerente ao teor de umidade em que esse solo se encontra. Sendo assim, os limites determinam os teores de umidade que delimitam os estados líquido e plástico (Limite de Liquidez) e plástico e quebradiço (Limite de Plasticidade). Os ensaios foram realizados de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 2016b) e NBR 7180 (ABNT, 2016c), conforme apresentado na Figura 20.

FIGURA 20 – DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ (A) E LIMITE DE PLASTICIDADE (B)



FONTE: A autora (2020).

Outra característica física do solo determinada foi a massa específica real dos grãos, que corresponde à relação entre a massa das partículas sólidas e seu volume. O parâmetro é fundamental para a determinação dos índices físicos do solo. O ensaio foi realizado de acordo com as recomendações do Departamento de Estradas de Rodagem, DNER-ME 093/94 (DNER, 1994a). A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados.

TABELA 3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Ensaio	01	02
Classificação (ABNT 6502/95)	Silte Arenoso-Argiloso	Silte Arenoso-Argiloso
Pedregulho (2,0 mm < % < 60 mm)	6,5	4,4
Areia (0,06 mm < % < 2,0 mm)	35,9	36,1
Silte (2 µm < % < 0,06 mm)	39,0	40,4
Argila (% < 2 µm)	18,6	19,1
Limite de Liquidez (%)		40,00
Limite de Plasticidade (%)		34,00
Massa específica real dos grãos (g/cm³)		2,557

FONTE: A autora (2020).

Por fim, foram determinadas a umidade natural e a massa específica natural de campo. Para isso, foram coletadas amostras indeformadas do solo em anéis de dimensões conhecidas (Figura 21). Esses dados são, também, fundamentais para a determinação dos índices físicos de campo. A partir dessas informações, calcularam-

se a massa específica aparente seca, o índice de vazios e o grau de saturação, parâmetros que nortearam a compactação do solo no modelo físico.

FIGURA 21 – COLETA DE AMOSTRA INDEFORMADA PARA DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES FÍSICOS



FONTE: A autora (2020).

A Tabela 4 apresenta os índices físicos calculados a partir de 4 amostras indeformadas coletadas em campo. Os valores médios obtidos foram escolhidos para auxiliar a determinação das condições em que o solo foi disposto no modelo físico. Os índices físicos determinados apresentaram baixos coeficientes de variação e proximidade com dados da literatura para solos residuais da Serra do Mar (Tabela 5).

TABELA 4 – ÍNDICES FÍSICOS DE CAMPO

Amostra	Massa específica natural (g/cm ³)	Umidade natural (%)	Massa específica aparente seca (g/cm ³)	Índice de vazios	Grau de saturação (%)
AI1	1,68	30,24	1,29	0,98	78,78
AI2	1,69	28,35	1,32	0,94	77,33
AI3	1,74	32,04	1,32	0,94	87,61
AI4	1,68	32,04	1,27	1,01	81,11
Média	1,70	30,67	1,30	0,97	81,21
Desvio padrão	0,03	1,52	0,02	0,03	3,93
Coeficiente de variação (%)	1,56	4,97	1,59	3,25	4,84

FONTE: A autora (2020).

TABELA 5 – ÍNDICES FÍSICOS DA LITERATURA

Autor	Solo	Massa específica natural (g/cm ³)	Umidade natural (%)	Massa específica aparente seca (g/cm ³)	Índice de vazios
Victorino (2015)	Residual Migmatito	1,714	25,6	1,26	1,16
		1,693	23,5	1,243	1,13
		1,724	26,6	1,245	1,21
		1,904	19,2	1,554	0,69
		1,659	20,5	1,296	1,04
Victorino (2015)	Residual Granito	1,631	22,9	1,29	1,04
		1,692	25,2	1,279	1,05
		1,66	27,4	1,156	1,24
Furman (2019)	Residual Granito	1,56	19,2	1,31	0,97
Média		1,69	23,34	1,29	1,06
Desvio padrão		0,09	2,95	0,10	0,15
Coeficiente de variação (%)		5%	13%	8%	15%

FONTE: Adaptado de Victorino (2015) e Furman (2019).

Os resultados obtidos para as amostras indeformadas se aproximaram dos resultados apresentados na literatura, em termos médios, principalmente para massa específica aparente seca e índice de vazios. Os resultados de Victorino (2015) são resultados de amostras indeformadas coletadas nos pontos indicados na Figura 16, muito próximos ao local de coleta do solo. Com exceção da amostra com índice de vazios de 0,69, as demais amostras de Victorino (2015) apresentaram índice de vazios superiores.

3.2.2 Curva de retenção de água pelo método do papel filtro

A curva de retenção de água foi determinada pelo método do papel filtro, cujos conceitos teóricos foram descritos em 2.1.2.2. Foram determinadas as curvas de secagem e umedecimento do solo e os procedimentos para o ensaio seguiram as recomendações de Marinho (1994) e da norma técnica D5298-16 (ASTM, 2016).

O ensaio foi realizado com amostras coletadas ao longo da fase de compactação do solo dentro da caixa de acrílico. Em cada camada coletaram-se 3 amostras através da cravação de anéis de 20 mm de altura e 48 mm de diâmetro. As amostras tiveram sua umidade inicial determinada com o solo resultante do processo de moldagem e seus índices físicos calculados. Das 48 amostras totais, 22 foram

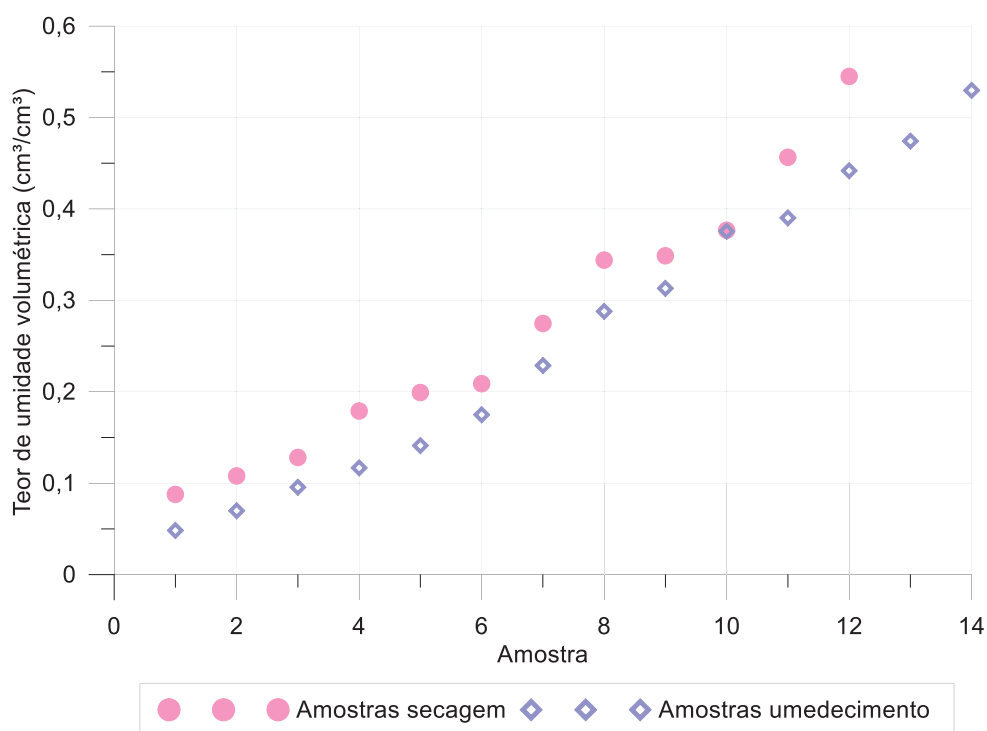
danificadas durante seu manuseio, 14 foram utilizadas para a determinação da curva de umedecimento e 12 para determinação da curva de secagem.

O ensaio para a determinação da curva de umedecimento foi realizado com as amostras de solo previamente secas em estufa à 40°C, atingindo, assim, sua umidade higroscópica. Após a secagem, as amostras foram umedecidas até a obtenção de teores de umidade que permitissem reproduzir o ciclo de umedecimento. Após a o umedecimento das amostras, aguardou-se o período de uma hora para a completa absorção da água.

Para a determinação da curva de secagem, as amostras foram umedecidas até a saturação e posteriormente secas até a obtenção de teores de umidade que permitissem reproduzir o ciclo de secagem.

A Figura 22 apresenta a distribuição das amostras em função da umidade volumétrica final, para os ensaios de umedecimento e secagem.

FIGURA 22 – DISTRIBUIÇÃO DAS AMOSTRAS EM FUNÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA



FONTE: A autora (2020).

Utilizou-se o papel filtro Whatman N°42 previamente cortado em círculos com diâmetro um pouco inferior ao diâmetro do anel. Marinho (1994) afirma que a sensibilidade da medida diminui com a redução do tamanho do papel e, portanto,

optou-se por manter a dimensão deste elemento próxima à da amostra. Os papéis foram levados à estufa a 105°C por 24 horas para que o ensaio fosse iniciado com o papel na condição seca. Após a secagem, estes foram imediatamente colocados em pacotes plásticos zipados e pesados para determinação de seu peso na condição seca.

Foram utilizados papéis nas duas faces da amostra. O conjunto (papel e amostra de solo) foi selado com duas camadas de plástico filme PVC e papel alumínio, além de um plástico zipado. As amostras foram mantidas em caixa térmicas de EPS, em ambiente com baixa variação de temperatura, por 30 dias para a obtenção do equilíbrio. Após o período de equilíbrio, determinou-se o peso úmido do papel e, com os dados obtidos anteriormente para o peso seco, a sua umidade. Todo o manuseio foi realizado com pinça metálica e sempre evitando a permanência do papel ao ar por mais de 5 segundos. A Figura 23 apresenta algumas imagens dos procedimentos do ensaio.

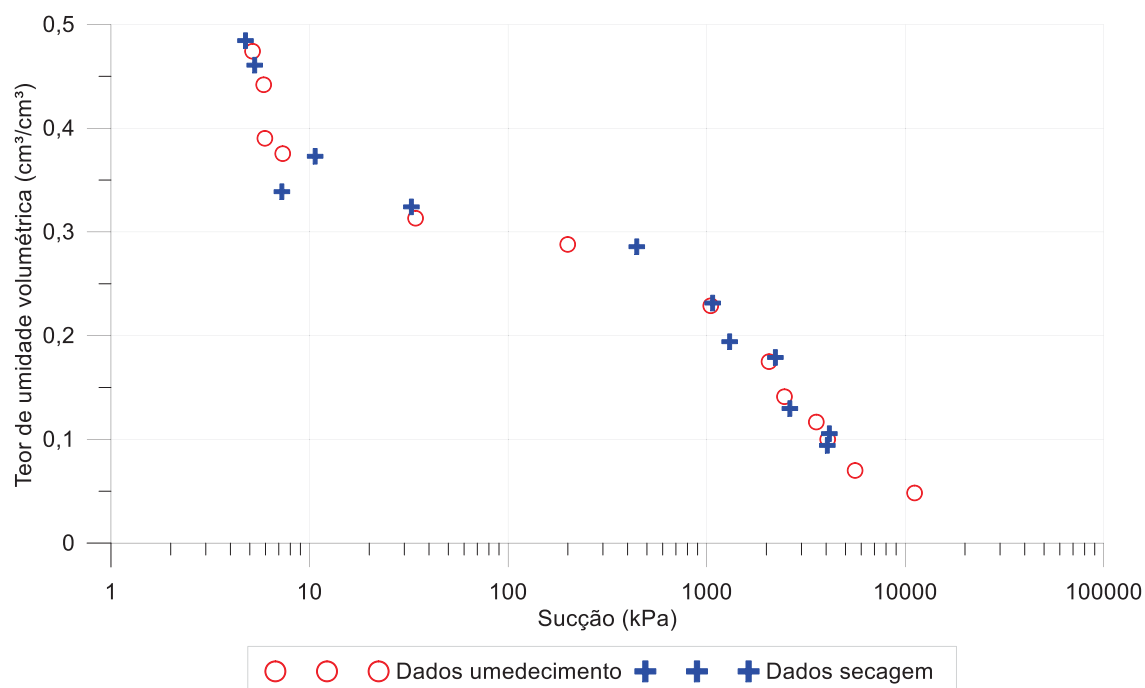
Com a determinação da umidade do papel, calculou-se a sucção através das equações propostas por Chandler et al. (1992). Para a determinação das curvas de umedecimento e secagem, consideraram-se as médias de sucção obtidas entre os papéis em contato com a face superior e inferior da amostra. A Figura 23 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de umedecimento e secagem.

FIGURA 23 – PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DO PAPEL FILTRO



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 24 – RESULTADOS DO ENSAIO DO PAPEL FILTRO PARA AS CURVAS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM

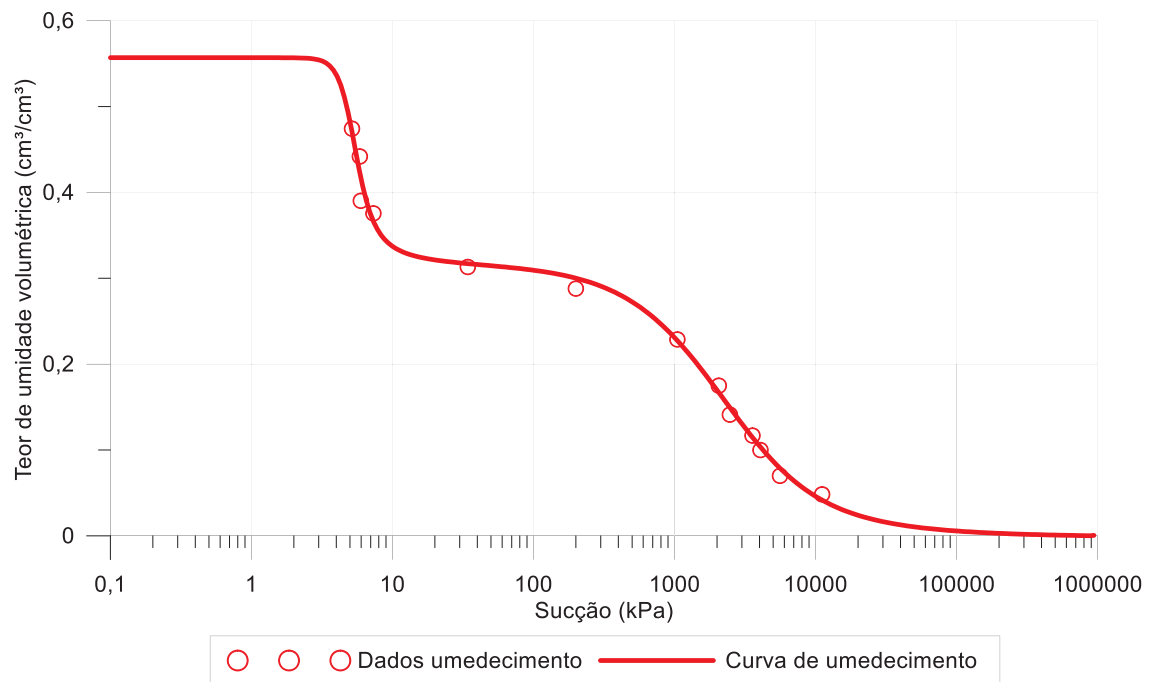


Fonte: A autora (2020).

Os dados demonstram comportamento bimodal para a curva de retenção do solo estudado. Além disso, a proximidade entre os valores obtidos para os ensaios de umedecimento e secagem sugerem a não existência do fenômeno de histerese, associado à forma de absorção e perda de água. Tal fato pode estar relacionado aos processos de preparação e remoldagem do solo, que envolveram o destorroamento e peneiramento, ocasionando a perda das propriedades originais do solo.

O ajuste da curva foi realizado com auxílio do módulo SVFLUX™GT do software SVOFFICE™5 (SoilVision, Canadá), utilizando a equação proposta por Fredlund et al. (2000) para solos com comportamento bimodal. Os dados utilizados foram os obtidos para a curva de umedecimento, obtendo-se um bom ajuste ao modelo selecionado, conforme apresentado na Figura 25. Os parâmetros de entrada para a determinação da curva foram a massa específica real dos grãos, determinada pelo método do picnômetro (Tabela 3), e o teor de umidade volumétrico na saturação, determinado através dos índices físicos obtidos no processo de compactação do solo no modelo físico.

FIGURA 25 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA



Fonte: A autora (2020).

3.2.3 Ensaio de permeabilidade

Outro parâmetro importante nas análises de fluxo em solos não saturados é a determinação da permeabilidade saturada. Por tratar-se de um material com permeabilidade intermediária, em função das parcelas de silte, areia e argila em sua composição, optou-se por determinar a permeabilidade saturada através de ensaios em permeâmetro de parede rígida para carga constante e para carga variável. Os ensaios seguiram as normativas NBR 13292 (ABNT, 1995) e NBR 14545 (ABNT, 2000).

A preparação das amostras para a realização dos ensaios foi uma etapa importante do desenvolvimento, dada a influência do índice de vazios na permeabilidade do material. O solo, proveniente da amostra deformada AD1, foi inicialmente moldado em um cilindro de proctor, considerando o índice de vazios obtido após a compactação do solo no modelo físico. Após a moldagem, amostras de 11,65 cm de altura e 10,40 cm de diâmetro foram extraídas para a realização dos ensaios através de talhagem, com auxílio de um molde cilíndrico.

Na base do permeâmetro utilizou-se uma tela metálica seguida de uma camada de material granular. Acima do material granular, uma camada de geotêxtil

foi utilizada para separação entre o corpo de prova e o material. Posicionou-se o corpo de prova acima do geotêxtil e preencheu-se o espaço entre o corpo de prova e a parede do permeâmetro com pasta de bentonita, para evitar um escoamento preferencial de água por essa região. A sequência de montagem do permeâmetro acima do corpo de prova foi o mesmo da base, geotêxtil, material granular e tela metálica. A Figura 26 apresenta algumas imagens do processo.

FIGURA 26 – SEQUÊNCIA DE MONTAGEM DO PERMEÂMETRO



Fonte: A autora (2020).

A saturação das amostras foi realizada com percolação ascendente. No ensaio de carga variável, determina-se o tempo (t) que uma carga inicial (H_i) é reduzida para uma carga final (H_f) em uma bureta de pequeno diâmetro graduada ao percolar o corpo de prova. A permeabilidade (k) é, então, calculada pela Equação (17).

$$k = \frac{a \cdot L}{t \cdot A} \log \left(\frac{H_i}{H_f} \right) \quad (17)$$

Em que a é a área da seção transversal da bureta, L é o comprimento de percolação, ou seja, a altura do corpo de prova e A é a área da seção transversal ao fluxo, correspondente à área da seção transversal do corpo de prova.

No ensaio de carga constante, dois reservatórios, um superior e um inferior a amostras geram uma diferença de carga (ΔH) que ocasiona um fluxo de água através do corpo de prova. O reservatório superior é mantido com carga constante e o volume de água percolado num determinado tempo e registrado, obtendo-se a vazão (Q) de percolação. Conhecendo-se o comprimento de percolação (L) e a área da seção transversal ao fluxo (A), determina-se a permeabilidade pela Equação (18).

$$k = \frac{Q \cdot L}{\Delta H \cdot A} \log \left(\frac{H_i}{H_f} \right) \quad (18)$$

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de permeabilidade a carga constante e a carga variável. Foram realizados três ensaios para carga constante e cinco ensaios para carga variável. Pelos dois métodos os resultados foram próximos.

TABELA 6 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

	Permeabilidade carga constante (cm/s)	Permeabilidade carga variável (cm/s)
Ensaio 01	1,81E-04	2,83E-04
Ensaio 02	1,90E-04	2,15E-04
Ensaio 03	1,95E-04	3,01E-04
Ensaio 04	-	2,76E-04
Ensaio 05	-	2,71E-04
Média	1,88E-04	2,69E-04

Fonte: A autora (2020).

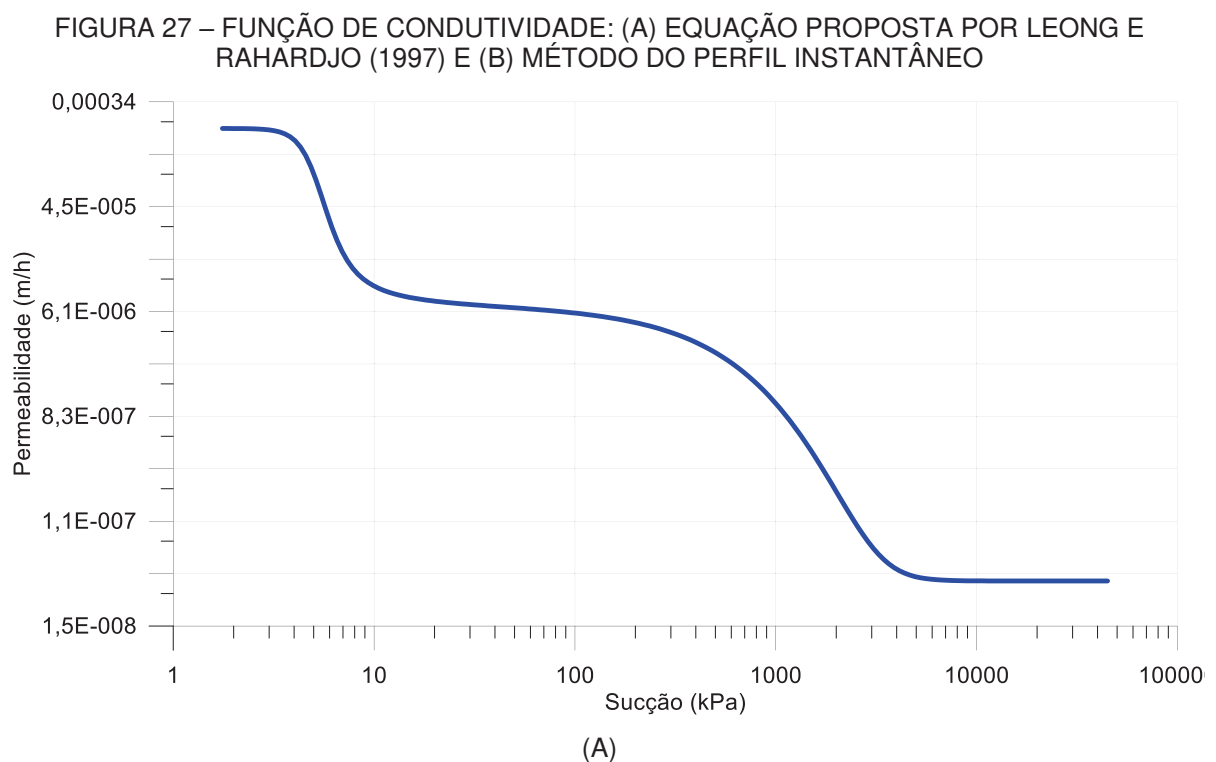
Considerando a permeabilidade do solo uma variável de difícil determinação, os resultados obtidos para os ensaios tanto a carga constante quanto a carga variável foram próximos. Considerou-se o valor de 1,88E-4 cm/s como a permeabilidade saturada do material.

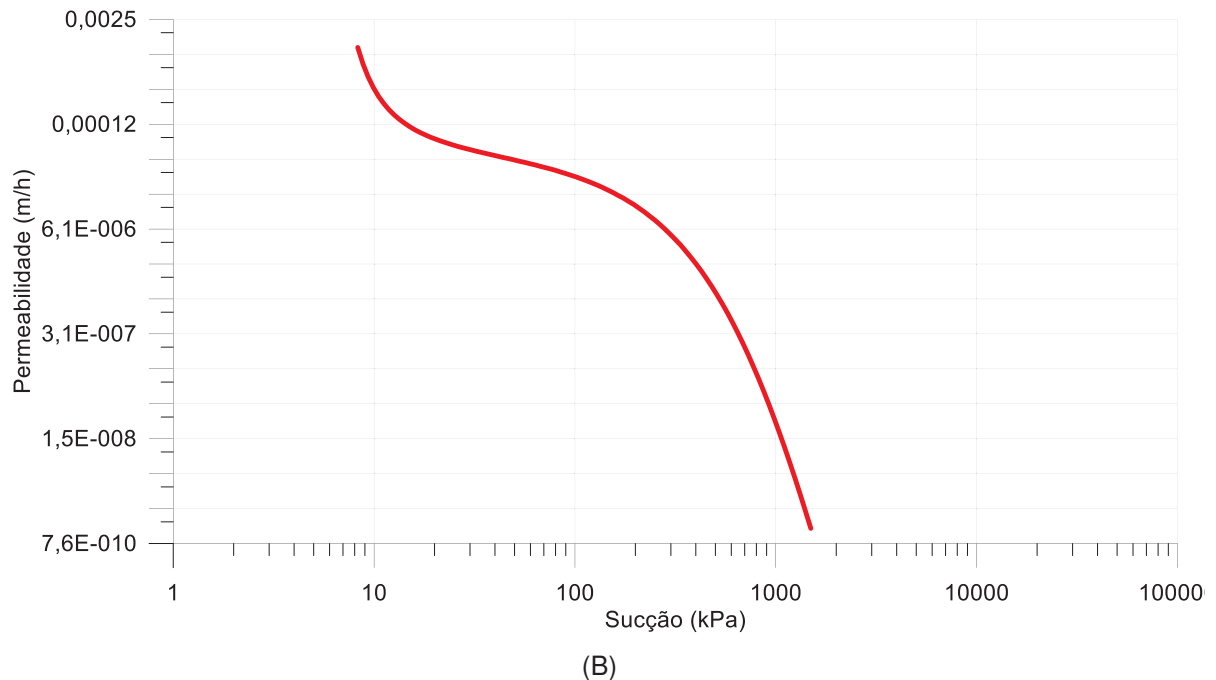
A função de condutividade foi ajustada com auxílio do módulo SVFLUX™GT do software SVOFFICE™5 (SoilVision, Canadá), utilizando a equação proposta por

Leong e Rahardjo (1997). Encontrou-se dificuldade em determinar a função para solos com comportamento bimodal, pois as equações propostas são, em geral, resultado das equações de ajustes para as curvas de retenção de água para solos com comportamento unimodal. Nesse sentido, aplicou-se o método do perfil instantâneo (apresentado no item 2.1.3.1) como alternativa para determinar a relação entre a sucção e a permeabilidade não saturada, com base nos resultados dos sensores de umidade.

Para possibilitar a aplicação do Método do Perfil Instantâneo utilizaram-se os dados dos sensores de umidade instalados na porção esquerda do modelo físico, que apresentaram melhores resultados, e a relação entre umidade e sucção definida pela curva de retenção de água para os dados de potencial mátrico. Algumas considerações foram realizadas para permitir a utilização do método: após a simulação de maior intensidade, o solo atingiu a saturação até a camada de 35 cm; distribuição da sucção em profundidade constante; evaporação nula.

A Figura 27 apresenta os resultados obtidos para a determinação pelo método proposto por Leong e Rahardjo (1997) e pelo Método do Perfil Instantâneo.





Fonte: A autora (2020).

3.3 COMPACTAÇÃO DO SOLO

Após a preparação do solo através da secagem e peneiramento, o material foi compactado dentro da caixa em acrílico. Na base, uma camada de 10 cm de areia foi utilizada para permitir a drenagem da água percolada, com um geotêxtil para separação entre areia e solo estudado.

O procedimento de compactação foi planejado com intuito de se obter um índice de vazios similar ao de campo, conforme apresentado na Tabela 4. Para isso, os procedimentos seguidos foram:

1. Determinação da umidade da amostra no momento da compactação;
2. Determinação da massa específica natural para a umidade determinada, considerando a massa específica aparente seca média apresentada na Tabela 4;
3. Determinação da massa de solo a ser compactada em 5 cm de altura, considerando o volume a ser preenchido.

Definida a massa de solo, o material foi disposto na caixa uniformemente em toda a área transversal. A compactação foi realizada com auxílio de um soquete composto por uma placa de madeira de 19 x 32 cm, acoplada a um peso. A massa final do conjunto foi 6,7 kg. A altura de queda foi controlada com um tubo de PVC com

um Cap em sua extremidade fixo na lateral da placa de madeira por uma abraçadeira, permitindo o deslocamento do tubo até o Cap. Dessa forma, a altura de queda manteve-se constante em 50 cm ao longo de todo o processo de compactação. A compactação exigiu 15 golpes com o soquete para cobrir a área transversal da caixa e a distribuição da aplicação dos golpes em cada camada de compactação foi realizada de forma a evitar o acúmulo de material em um ponto específico, portanto, em cada camada de compactação a ordem de aplicação foi variada. A Figura 28 apresenta um esquema da distribuição da compactação.

FIGURA 28 – DISTRIBUIÇÃO DA COMPACTAÇÃO

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15

Fonte: A autora (2020).

Ao fim da compactação de cada camada, 3 amostras de solo em anéis metálicos de 20 mm de altura e 48 mm de diâmetro foram coletadas para a determinação dos índices físicos da camada. Além disso, com o material excedente do processo de cravação dos anéis determinou-se a umidade do solo para confirmação do valor considerado inicialmente. As amostras foram coletadas nas bordas da caixa, quadrantes 6 (lado esquerdo) e 10 (lado direito) da Figura 28, e no cento, quadrante 8. O local de coleta foi preenchido novamente com solo e compactado para manter a uniformidade da camada. Frisos superficiais foram realizados no solo com uma espátula para melhoraria da interface entre as camadas. As imagens da Figura 29 apresentam as fases do processo de compactação.

FIGURA 29 – FASES DA COMPACTAÇÃO



Fonte: A autora (2020).

Na camada superior, a fim de se evitar um caminho preferencial de água entre a face do acrílico e o solo, uma camada de bentonita foi aplicada na interface entre solo e paredes laterais da caixa. Para isso, foram realizadas aberturas de 5 x 5 cm com auxílio de uma espátula e preenchimento dessas aberturas com pasta de bentonita. A Figura 30 apresenta as fases de abertura e preenchimento das laterais com a bentonita.

FIGURA 30 – APLICAÇÃO DE BENTONITA NA INTERFACE SOLO ACRÍLICO



O controle da compactação foi realizado através da avaliação da energia e compactação aplicada em cada camada e através da remoção dos anéis para determinação dos índices físicos. Com o método de compactação aplicado não foi possível atingir o índice de vazios desejado, seguindo os parâmetros determinados

para o solo em seu estado indeformado. A Tabela 7 apresenta a média, desvio padrão e coeficiente de variação dos parâmetros monitorados durante o processo de compactação. Observa-se que o índice de vazios resultante é superior ao determinado pelas amostras indeformadas coletadas em campo (Tabela 4), mas similares a alguns resultados determinados por outros autores para solos residuais da Serra do Mar (Tabela 5). Ressalta-se, entretanto, que os índices físicos de campo e da literatura serviram apenas como referência para a definição do processo de compactação, uma vez que o solo estudado é resultante de uma amostra deformada.

Em relação aos coeficientes de variação, os valores obtidos foram de 19% para a energia de compactação e inferiores para os demais índices físicos. A classificação do coeficiente de variação é complexa, pois depende tanto do ensaio realizado quanto da variável analisada. Para fins de comparação, entretanto, os valores obtidos podem ser classificados como baixo para massa específica natural, massa específica seca e índice de vazios (inferiores a 10%) e médio para a energia de compactação (entre 10% e 20%), utilizando uma classificação proposta por Pimentel Gomes (2000).

A Tabela 8 apresenta os índices físicos médios calculados pelas amostras coletadas nos anéis, para as posições laterais e central da caixa. Observa-se uma variação entre os índices: pela maior dificuldade encontrada na compactação das bordas, o índice de vazios das laterais é superior ao do centro. Além disso, os anéis coletados na porção esquerda, quadrante 6 da Figura 28, apresentaram valores ligeiramente superiores de índice de vazios resultante e coeficientes de variação inferiores. Dessa forma, obteve-se uma compactação mais homogênea no centro a porção esquerda da caixa, em comparação com a porção direita.

TABELA 7 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS MONITORADOS DURANTE A COMPACTAÇÃO

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
Energia de compactação da camada (kg.cm/cm ³)	0,37	0,07	19%
Massa específica natural (g/cm ³)	1,45	0,07	5%
Massa específica seca (g/cm ³)	1,13	0,05	5%
Índice de vazios	1,26	0,11	9%

Fonte: A autora (2020).

TABELA 8 – VALORES MÉDIOS DOS ÍNDICES FÍSICOS DETERMINADOS PELOS ANEIS

Parâmetro	Posição		
	Esquerda	Central	Direita
Massa específica (g/cm ³)	1,43	1,48	1,45
Massa específica seca (g/cm ³)	1,12	1,15	1,13
Índice de vazios	1,29	1,22	1,27

Fonte: A autora (2020).

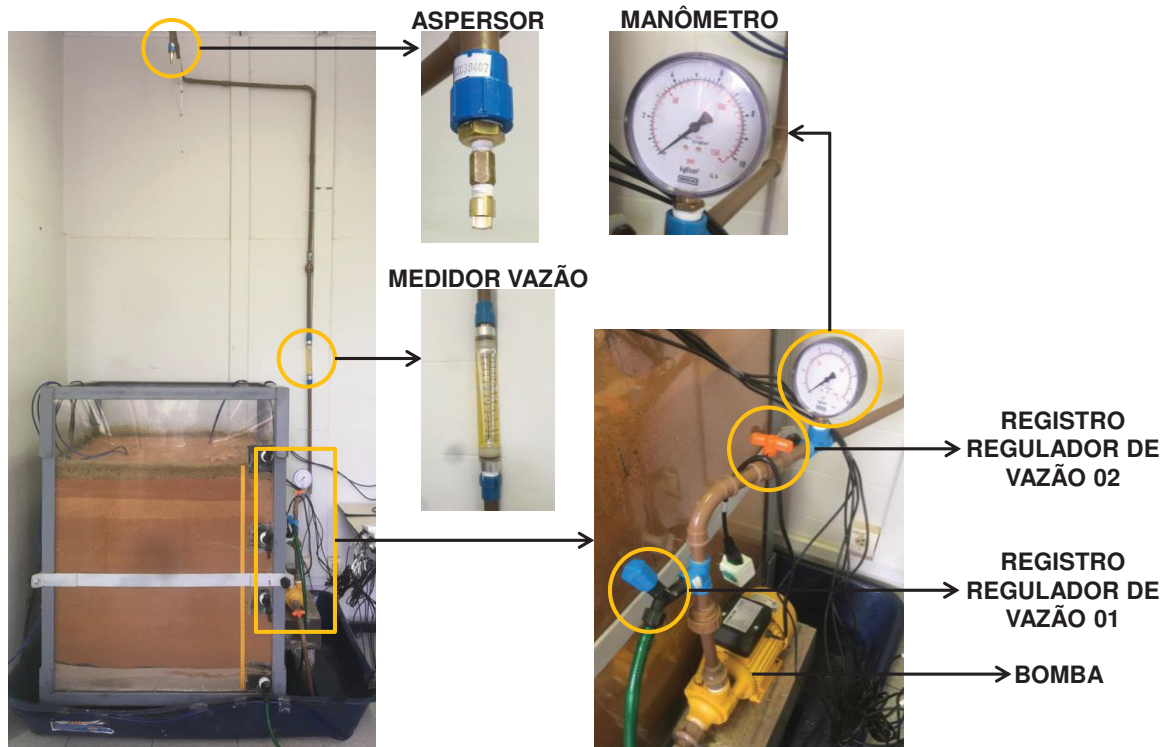
Com o controle de compactação utilizado, apesar da dificuldade do processo, foi possível obter um solo com uma boa homogeneidade, principalmente no centro e porção esquerda do modelo físico. Em relação ao índice de vazios, o resultado esperado, baseado nas amostras indeformadas coletadas em campo, não foi atingido. Entretanto, os resultados foram similares aos obtidos por Victorino (2015) em amostras indeformadas coletadas próximas ao local de coleta do solo para o estudo. Dessa forma, apesar das limitações conhecidas ao se trabalhar com amostras deformadas, o resultado obtido com o processo de compactação pode representar as condições reais do solo em campo.

3.4 SIMULAÇÃO DE CHUVA

Os componentes do sistema de simulação de chuva desenvolvido são: um bico de pulverização modelo FullJet HH-1/8-1.5-Q (Spraying System Co., EUA), uma bomba elétrica de água periférica de 735,5 W (1 cv), dois registros reguladores de vazão, um manômetro convencional e um medidor de vazão do tipo rotâmetro modelo FL46302 (Omega Engineering Brazil, Brasil). A estrutura que alimenta o simulador é composta por tubos de PVC de 20 mm de diâmetro e a água que circula no sistema provém de um reservatório, que também é utilizado para coletar a água excedente da geração de chuva, cujas dimensões são de 120x90x35 cm, com capacidade máxima de armazenamento de 370 L.

A bomba pressuriza a água do reservatório para o sistema; o registro regulador de vazão 01 desvia o excesso de água para o reservatório novamente; o registro regulador de vazão 02 permite controlar a vazão que alimenta o aspersor; o manômetro e o medidor de vazão auxiliam no controle da vazão aplicada e, por fim, o aspersor simula a geração de gotas da precipitação.

FIGURA 31 – SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE CHUVA



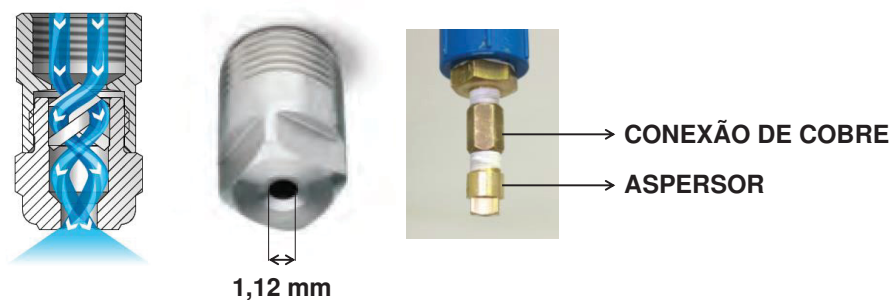
Fonte: A autora (2020).

O aspersor utilizado possui um padrão de distribuição em um cone sólido com uma área de impacto circular. O design do produto minimiza a turbulência do fluido para garantir uma distribuição de pulverização uniforme. A saída do aspersor possui 1,12 mm de diâmetro e sua estrutura interna é composta por palhetas, conforme apresentado na Figura 32. O aspersor trabalha com pressões entre 35 e 690 kPa (5 e 100 psi) e gera gotas com tamanhos de 1 a 5 mm. Os tamanhos das gotas são ligeiramente maiores do que aqueles apresentados por uma precipitação natural, propriedade que possui impacto em estudos de erosão (CERDÀ, 1997; NAVAS et al., 1990). A infiltração, entretanto, depende principalmente da intensidade da chuva e secundariamente das propriedades do solo (BOTHMA, VAN RENSBURG, & LE ROUX, 2012). Portanto, o diâmetro da gota não apresenta grande influência em estudos de infiltração.

O sistema foi calibrado até a obtenção da relação entre pressão, vazão e precipitação resultante. Para avaliar a precipitação simulada, dois fatores foram monitorados: a uniformidade da distribuição e a intensidade média de precipitação, os fatores mais importantes na reprodução de processos de infiltração no solo.

Características como tamanho da gota, velocidade e energia cinética, parâmetros fundamentais em análises de erosão e escoamento, não foram avaliados.

FIGURA 32 – MODELO DE ASPERSOR DE CONE CHEIO

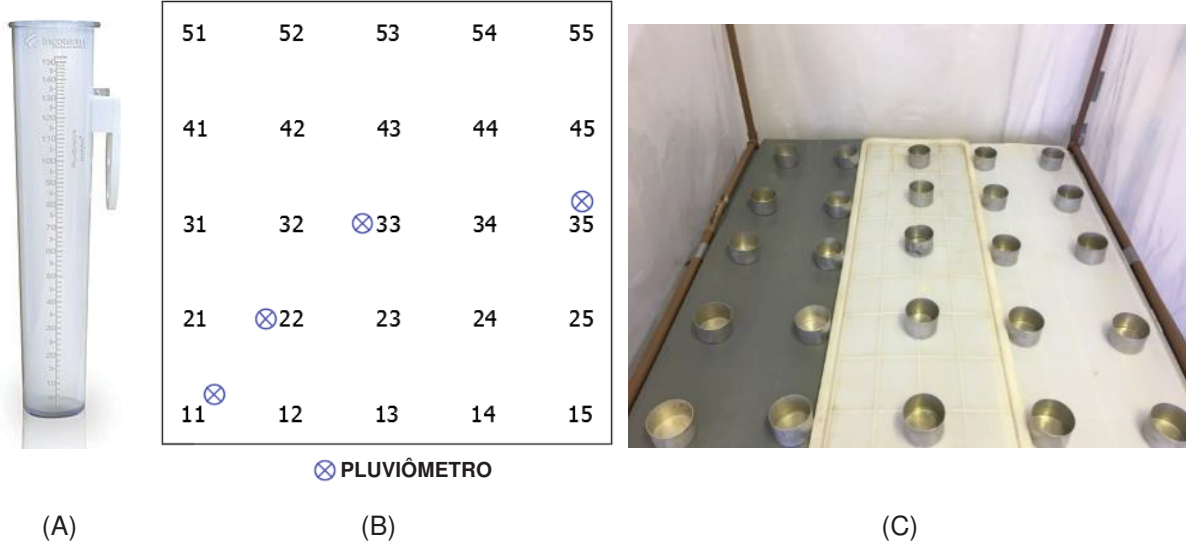


Fonte: A autora (2020).

Para o conhecimento da uniformidade da distribuição, calculou-se o coeficiente de Christiansen, conforme apresentado no item 2.4. Vinte e cinco cápsulas de aproximadamente 25 cm de diâmetro foram dispostas na caixa em uma malha retangular de 5 x 5 cm, de forma que a cápsula central ficou alinhada com o aspersor (Figura 33), para a realização de testes.

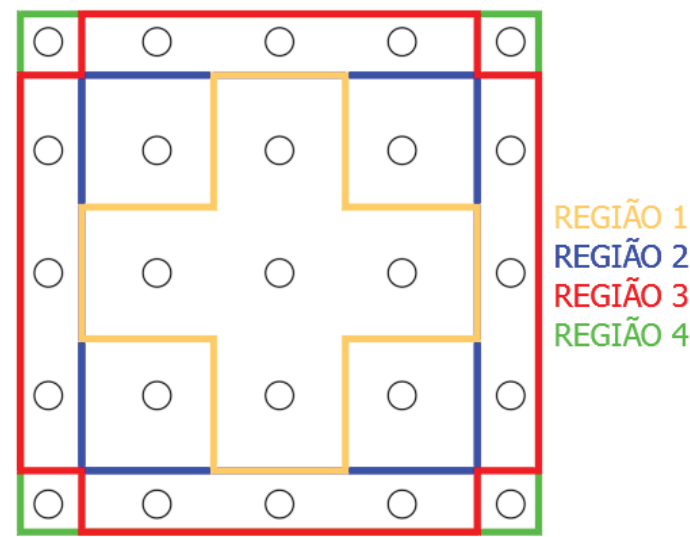
Além das cápsulas, quatro pluviômetros de leitura direta, que permitem registros de precipitação de 0 a 150 mm, foram posicionados em regiões da área transversal da caixa para a determinação da intensidade da precipitação. As posições dos pluviômetros, apresentadas na Figura 33, foram escolhidas após a determinação do padrão de distribuição das gotas, identificado pela similaridade na massa de água coletada em cada cápsula após os testes de uniformidade. Dessa forma, foi possível identificar os pontos mais representativos para o posicionamento dos pluviômetros e consequente determinação da intensidade de precipitação. A Figura 34 apresenta as regiões identificadas a partir das simulações iniciais: são quatro regiões que demonstram um padrão geração de gotas aproximadamente concêntricas em relação ao aspersor. A Tabela 9 apresenta as características de cada região.

FIGURA 33 – DETERMINAÇÃO DA UNIFORMIDADE E INTENSIDADE: (A) PLUVIÔMETRO, (B) DISTRIBUIÇÃO DAS CÁPSULAS E PLUVIÔMETROS E (C) CÁPSULAS



Fonte: A autora (2020).

FIGURA 34 – PADRÃO DE GERAÇÃO DE GOTAS



Fonte: A autora (2020).

TABELA 9 – CARACTERÍSTICAS DAS REGIÕES DE PRECIPITAÇÃO SEMELHANTE

Região	Quantidade de cápsulas	Área (m2)
1	5	0,28
2	4	0,22
3	12	0,32
4	4	0,04

Fonte: A autora (2020).

A determinação do coeficiente de uniformidade (Cu) é importante para avaliação da uniformidade espacial da precipitação simulada. Quanto mais uniforme for, mais próximo de 100% é o Cu. A avaliação do coeficiente se deu em função das regiões apresentadas na Tabela 9, ou seja, determinou-se o coeficiente para cada região. A região 1 contemplando as 5 cápsulas posicionadas dentro dela, a região 2 contemplando as 4 com padrão de gotas similar, além das 5 cápsulas da região 1, totalizando 9 cápsulas, e assim sucessivamente. O coeficiente de uniformidade da região 4 foi calculado considerando todas as 25 cápsulas avaliadas. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para o coeficiente de uniformidade por região.

TABELA 10 – COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE POR REGIÃO

Região	Quantidade de cápsulas avaliadas	Área total (m ²)	Cu médio (%)
1	5	0,28	95%
2	9	0,50	87%
3	21	0,82	58%
4	25	0,86	45%

Fonte: A autora (2020).

Para as regiões 3 e 4 o coeficiente de uniformidade foi insatisfatório. Para a região 2, entretanto, o resultado obtido foi positivo. Essa região contempla uma área de 0,50 m², que corresponde a um quadrado de 71 x 71 cm, região em que estão instalados os sensores de umidade e os piezômetros.

Os testes de calibração para determinação da uniformidade e intensidade foram realizados em três configurações diferentes de vazão e pressão, gerando três intensidades de precipitação. Para cada configuração, quatro testes foram realizados. Nos testes para determinação da uniformidade, as cápsulas foram posicionadas conforme apresentado e o sistema mantido a vazão e pressão constantes por 10 minutos. Para a determinação da intensidade de precipitação, os pluviômetros foram posicionados nas regiões determinadas e o sistema foi mantido a pressão e vazão constantes por 20 minutos. A leitura do pluviômetro foi realizada após cada teste.

Conhecendo-se a área de influência de cada região (Tabela 9) e a precipitação atuante, foi possível determinar uma precipitação média para a área total de solo, através da Equação (19), sendo P a precipitação total e P₁, P₂, P₃ e P₄ as precipitações registradas em cada pluviômetro posicionado nas regiões.

$$P = \frac{P_1 \cdot 0,28 + P_2 \cdot 0,22 + P_3 \cdot 0,32 + P_4 \cdot 0,04}{0,86} \quad (19)$$

Os testes foram realizados em três diferentes cenários de intensidade de precipitação (média, alta e muito alta) variando a vazão e pressão aplicada. A Tabela 11 apresenta os resultados de intensidade de precipitação obtidos para cada cenário simulado.

TABELA 11 – INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO

Cenário de precipitação	Média	Alta	Muito alta
Pressão (kPa)	69	138	255
Vazão (m³/s)	6,31E-06	9,46E-06	1,26E-05
Intensidade (mm/h)	64	79	105

Fonte: A autora (2020).

As intensidades resultantes do simulador de precipitação desenvolvido (64, 79 e 105 mm/h) são condizentes com resultados de outros autores para simuladores de precipitação semelhante, conforme apresentado em 2.4. Lora et al. (2016) desenvolveram um simulador com intensidade mínima de precipitação de 50 mm/h e máxima de 150 mm/h. Já o simulador desenvolvido por Mhaske et al. (2019) resultou em intensidades mínima e máxima de 65 mm/h e 148 mm/h.

O modelo foi monitorado entre maio e julho de 2020. Ao longo do monitoramento foram realizadas 6 simulações de precipitação no modelo final. A Tabela 12 apresenta a data e hora da simulação, o tempo de aplicação da precipitação e a intensidade média da precipitação resultante.

TABELA 12 – SIMULAÇÕES DE PRECIPITAÇÃO

Simulação	Data	Hora	Tempo de aplicação (min)	Intensidade média de precipitação (mm/h)
1	08/05/20	17:30	30	52,50
2	09/06/20	12:10	30	52,50
3	18/06/20	16:20	30	52,50
4	25/06/20	16:00	20	35,00
5	14/07/20	16:00	60	105,00
6	21/07/20	15:10	30	52,50

Fonte: A autora (2020).

Em comparação com precipitações reais, os valores obtidos são coerentes se comparados com acumuladores de precipitação diária, conforme apresentado por Silva et al. (2019). Os autores desenvolveram limiares pluviométricos para deflagração de movimentos de massa para a região de onde o solo utilizado na pesquisa foi coletado. Os dados de monitoramento de pluviógrafos instalados ao longo da rodovia mostram que, de dezembro a março, a precipitação local pode atingir de 100 a 200 mm em 24 horas. Os limiares pluviométricos desenvolvidos demonstram que acumulados de 100 mm de precipitação em 24 horas apresentam elevada probabilidade de deflagração de movimentos de massa.

3.5 INSTRUMENTAÇÃO

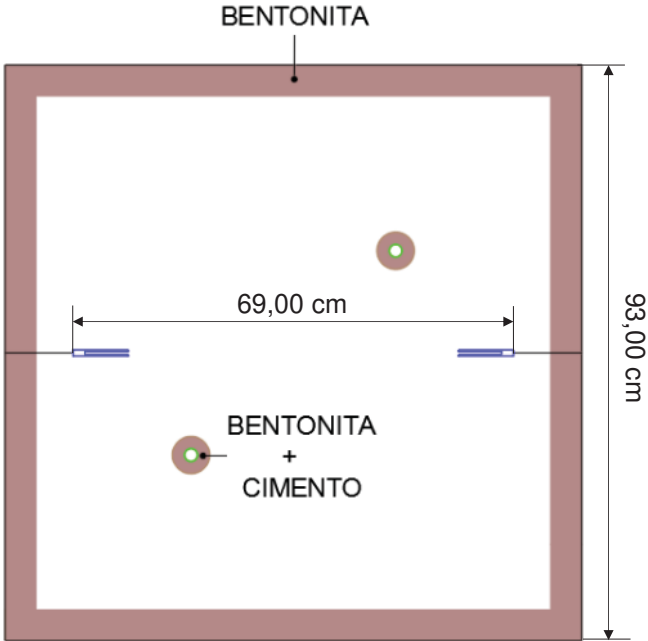
Os instrumentos utilizados para o monitoramento da água no solo são quatro piezômetros elétricos de corda vibrante modelo 4500S (Geokon, USA) e dez sensores de umidade modelo EC-05 (METER Group Inc., USA). A distribuição dos instrumentos em profundidade é apresentada na Tabela 13 e a locação dos instrumentos em planta e corte é apresentada na Figura 35. Além dos sensores instalados no solo, um sensor de umidade e temperatura do ar foi utilizado a fim de monitorar as condições do ambiente. Todos os sensores possuem leituras automatizadas, permitindo a aquisição contínua e ininterrupta dos dados.

TABELA 13 – DISTRIBUIÇÃO DOS SENSORES EM PROFUNDIDADE

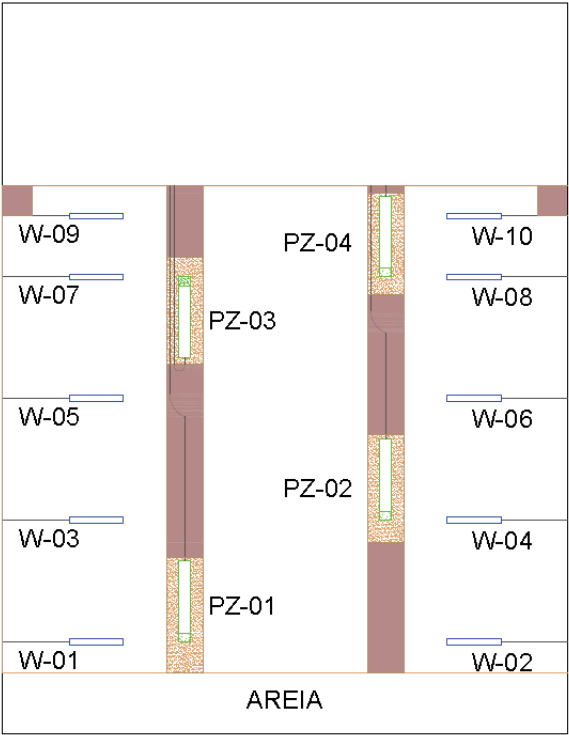
Profundidade (cm)	Piezômetro	Sensor de umidade
05	-	2
15	2	2
35	-	2
55	1	2
75	1	2

FONTE: A autora (2020).

FIGURA 35 – LOCAÇÃO DOS INSTRUMENTOS (A) EM PLANTA E (B) EM CORTE



(A)



(B)

Fonte: A autora (2020).

A Tabela 14 apresenta um resumo das principais características dos instrumentos de acordo com os fabricantes.

TABELA 14 – RESUMO PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS INSTRUMENTOS

Instrumento	Fabricante Modelo	Propriedade medida	Faixa de leitura	Resolução	Precisão
Piezômetro de corda vibrante	Geokon 4500S	Poropressões negativas e positivas	- 100 a 350 kPa	0,0875 kPa (0,025% F.S.)	+/- 0,35 kPa (0,1% F. S.)
Sensor de Umidade	METER Group EC-5	Teor volumétrico de água	0% - 100%	0,001 m ³ /m ³	+/- 3%
Sensor de umidade e temperatura do ar	Aosong Electronics DHT11	Temperatura Umidade	0 a 50°C 20 a 90%	-	+/- 2°C +/- 5%

FONTE: A autora (2020).

3.5.1 Sensor de umidade e temperatura do ar

Para o monitoramento da umidade e temperatura do ar utilizou-se o sensor DHT11, um sensor de baixo custo que permite registo de temperatura entre 0 e 50°C e de umidade relativa do ar entre 20 a 90%. O elemento do sensor de temperatura é um termistor do tipo NTC. Um termistor é um dispositivo elétrico que apresenta sua resistência alterada termicamente, sendo assim, o dispositivo apresenta um valor de resistência elétrica para cada temperatura. O termistor do tipo NTC apresenta redução da resistência elétrica com o aumento da temperatura. Para o monitoramento da umidade relativa, o dispositivo utilizado é o HR202, que se trata de um tipo de resistor sensível à umidade.

O sensor DHT11 foi acoplado a um Arduíno, computador que se programa para processar entradas e saídas entre dispositivo e os componentes externos ligados a ele, para a programação da aquisição e armazenamento dos dados. O sistema foi desenvolvido em parceria com integrantes do Laboratório de Magnetismo, Medidas e Instrumentação (LAMMI) da Universidade Federal do Paraná, utilizando um Arduíno, um módulo de gravação SD, um cartão SD e um RTC (Real Time Clock). O módulo de gravação permite a conexão entre Arduíno e cartão SD para o armazenamento dos dados e o RTC permite identificar esses dados em função do tempo. A frequência de

aquisição dos dados é programável e foi definida com uma taxa de aquisição de 10 minutos.

3.5.2 Piezômetros elétricos

O modelo de piezômetro de corda vibrante utilizado é o 4500S-350KPA (Geokon Inc., USA). O instrumento é composto por um diafragma sensível à pressão, conectado a um fio de aço inoxidável que vibra em sua frequência natural através da excitação de uma bobina interna. Pressões atuantes no diafragma alteram a frequência de vibração do fio, captada por outra bobina interna. A intensidade da pressão é proporcional ao quadrado da frequência de vibração do fio, permitindo assim, o conhecimento da poropressão atuante no solo (GEOKON, 2009).

Para a instalação dos sensores foram realizados dois furos com trado manual com 1" (2,54 cm) de diâmetro. Em cada furo, dois sensores foram instalados em camada permeável de areia, seguido por uma camada selante de cimento, bentonita e água, conforme apresentado na Figura 35. Na profundidade de 15 cm, dois piezômetros foram instalados, um com a ponta porosa posicionada para cima e outro com a ponta porosa posicionada para baixa, método comum de instalação, a fim de permitir a comparação dos resultados nos dois métodos.

Para correta leitura do sensor, a pedra porosa deve estar saturada, portanto, antes da instalação, procedeu-se com a saturação. Com o sensor posicionado para cima, preencheu-se o espaço entre a ponta e o diafragma com água e posicionou-se a pedra novamente, pressionando-a para baixo. Dessa forma, a água excedente foi removida através dos poros da pedra, saturando-a. Esse é o procedimento recomendado pelo fabricante.

Além da saturação, uma leitura inicial com o sensor ao ar deve ser realizada antes da instalação. Essa leitura permite a conversão dos dados em dígitos, unidade de saída do sensor, para pressão, através das constantes de calibração de cada piezômetro. A leitura foi realizada com auxílio de uma unidade de leitura de corda vibrante, com o piezômetro ao ar. Por tratar-se de uma variável fundamental para a correta conversão de dados, realizou-se uma conferência das leituras iniciais de cada piezômetro. Para isso, com o piezômetro posicionado dentro de uma proveta, algumas pressões foram simuladas e as leituras registradas. Com essas leituras, foi possível aferir a leitura inicial (leitura zero) através da equação de conversão.

$$P = (R_1 - R_0)G + (T_1 - T_0)K \quad (20)$$

Em que:

P = Pressão (kPa);

R_1 = Leitura do sensor (dígitos);

R_0 = Leitura zero, ao ar (dígitos);

G = Fator de calibração dígito/kPa;

T_1 = Temperatura do sensor (°C);

T_0 = Temperatura zero, ao ar (°C);

K = Fator de calibração °C/kPa;

A Figura 36 apresenta algumas imagens dos procedimentos prévios à instalação e dos procedimentos de instalação.

FIGURA 36 – PROCEDIMENTOS DE INSTALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS





Fonte: A autora (2020).

A aquisição de dados dos piezômetros foi realizada com auxílio de um *datalogger* modelo DT2055B (RST Instruments, Canada). O aparelho (Figura 37) trata-se de um registrador de dados de corda vibrante com 5 canais de entrada, que permite a aquisição contínua e ininterrupta dos dados. A coleta de dados e programação é realizada com auxílio de um software nomeado DT Logger Host e a configuração escolhida foi baseada numa taxa de aquisição de dados de 10 minutos.

FIGURA 37 – DATALOGGER PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DOS PIEZÔMETROS ELÉTRICOS



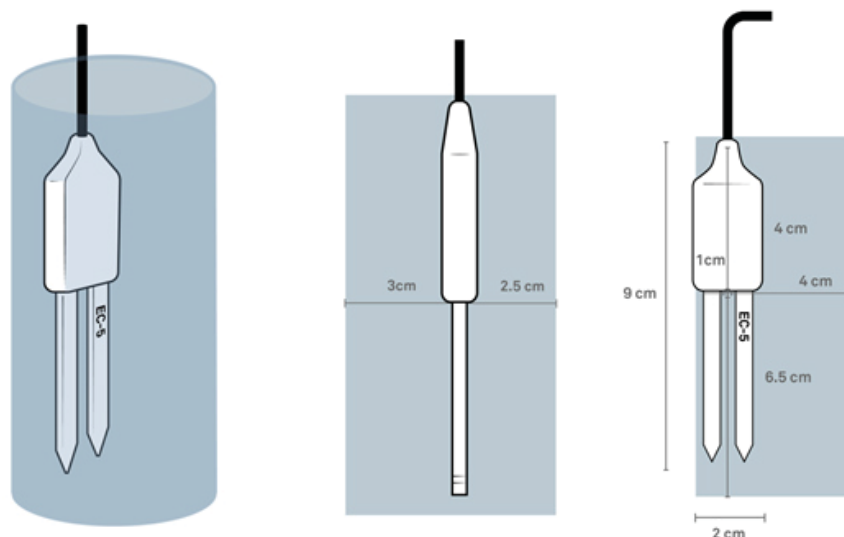
Fonte: A autora (2020).

3.5.3 Sensores de umidade

O sensor de umidade modelo EC-05 (METER Group, Inc., USA) determina o teor volumétrico de água através da mensuração da constante dielétrica do meio, usando capacitância e domínio da frequência. A frequência de 70 MHz utilizada minimiza efeitos de textura e salinidade, tornando o sensor preciso em todos os tipos de solo. O instrumento possui 8,9 cm de comprimento e possui um volume de medição de aproximadamente 0,2 L (litros), sendo recomendado para medidas de pequeno volume de influência (METER GROUP, 2019). A Figura 38 apresenta um esquema do volume de medida do sensor.

A instalação do sensor foi realizada ao longo das camadas de compactação do solo, em material já compactado, a fim de garantir um bom contato do sensor com o solo e evitar danos no instrumento pelo processo de compactação. O processo de instalação seguiu os seguintes passos: compactação da camada; realização de uma pequena escavação com 11 cm de distância da caixa em acrílico 6 cm de profundidade; cravação do sensor no sentido horizontal com as hastes posicionadas no sentido vertical (perpendiculares à superfície do solo); recompactação do solo na abertura escavada; fixação do cabo na caixa em acrílico.

FIGURA 38 – VOLUME DE MEDIDA DO SENSOR DE UMIDADE EC-5



FONTE: METER Group (2019).

FIGURA 39 – INSTALAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE



Fonte: A autora (2020).

A conversão de dados do sensor é realizada através de uma equação fornecida pelo fabricante. Para garantir a precisão dos dados, o sensor foi calibrado para o solo estudado através de ensaios prévios à instalação. Para esse procedimento, o solo foi moldado em um cilindro de proctor, considerando as propriedades físicas apresentadas na Tabela 4, e o sensor instalado no centro do cilindro (Figura 40). A umidade registrada pelo sensor foi monitorada com auxílio de um *datalogger* e pequenas amostras foram coletadas para determinação da umidade gravimétrica pelo método da estufa. A umidade gravimétrica foi convertida em umidade volumétrica através da Equação (21).

$$\theta = w \cdot \rho_d \quad (21)$$

Em que:

θ = Teor de umidade gravimétrico;

w = Teor de umidade volumétrico;

ρ_d = Massa específica aparente seca; (g/cm³);

FIGURA 40 – CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE UMIDADE



Fonte: A autora (2020).

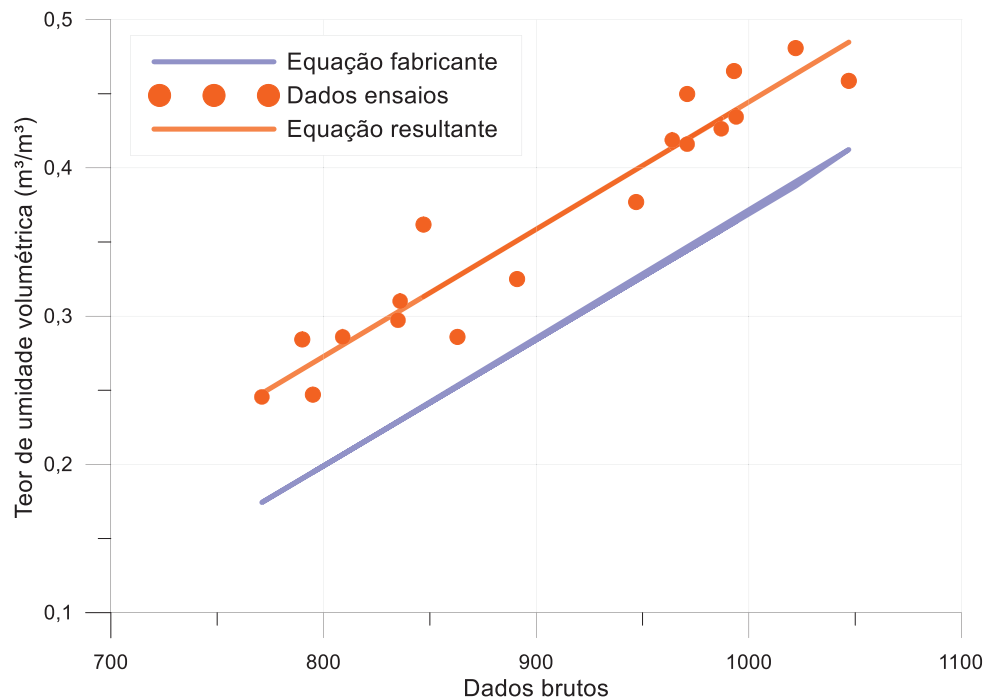
Foram realizadas 20 simulações com adição de água para a determinação da umidade gravimétrica e comparação com os dados brutos registrados pelo sensor. Através da técnica de regressão linear simples, determinou-se uma equação linear para correlacionar os dados brutos do sensor com o teor de umidade volumétrico. A equação resultante apresentou coeficiente angular idêntico ao da equação original do fabricante, com diferença apenas no coeficiente linear. O coeficiente de determinação resultante (R^2), que varia de 0 a 1 de acordo com o ajuste dos dados em relação ao modelo linear, apresentou o valor de 0,92. A Tabela 15 apresenta os coeficientes da equação de calibração do fabricante e da equação determinada pelos ensaios e a Figura 41 apresenta os dados resultantes.

TABELA 15 – EQUAÇÃO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE UMIDADE

Equação	Coeficiente angular	Coeficiente linear
Fabricante	8,5E-4	-0,48
Determinada	8,85E-4	-0,41

FONTE: A autora (2019).

FIGURA 41 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE UMIDADE



Fonte: A autora (2020).

Para a aquisição de dados dos sensores de umidade utilizaram-se dois o *dataloggers* modelo Em50G (Decagon Devices Inc., 2012). Cada *datalogger* possui 5 canais de entrada para sensores. A coleta de dados e programação é realizada com auxílio do software ECH₂O Utility. A programação considerou taxa de aquisição de dados de 10 minutos.

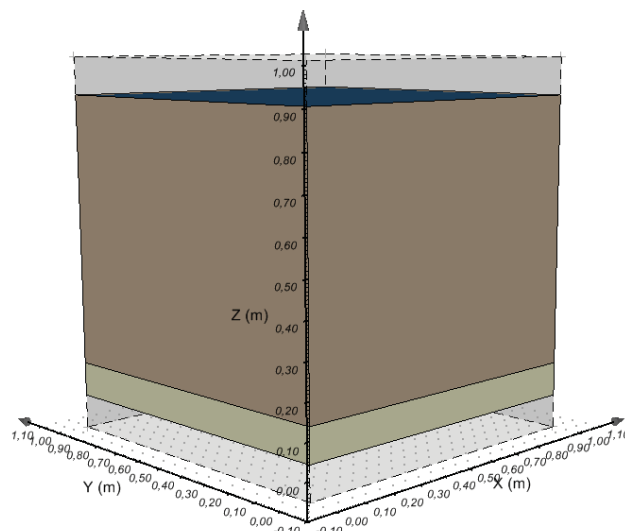
3.6 MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica do experimento foi realizada no módulo SVFLUX™GT do software SVOFFICE™5 (SoilVision, Canadá), o qual permite a modelagem do fluxo de água em solos e rochas saturados ou insaturados. O modelo foi definido em três dimensões, com aplicação de fluxo de mesma intensidade da primeira simulação realizada e da evaporação estimada. A análise numérica foi realizada para os mesmos tempos avaliados nos dados dos sensores.

Na criação do modelo considerou-se um sistema de coordenadas em três dimensões e um fluxo do tipo transiente. A forma h convencional da equação diferencial parcial que governa o fluxo transiente é implementada no software. Outras formas de consideração da equação não estão disponíveis para o módulo utilizado.

O modelo foi dividido em duas regiões: uma camada de 80 cm de solo sobrejacente a uma camada drenante de 10 cm de areia, conforme apresentado na Figura 42.

FIGURA 42 – CONCEPÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.



FONTE: A autora (2020).

As propriedades do solo foram definidas de acordo com os ensaios realizados. Os parâmetros de entrada para o caso de materiais na condição não saturada são a curva de retenção de água e a função de condutividade hidráulica. O solo foi modelado considerando a curva de retenção de água apresentada no item 3.2.2 e as funções de condutividade apresentadas no item 3.2.3. Foram realizadas simulações para cada uma das funções de permeabilidade apresentadas.

Para a camada drenante, foram utilizados dados disponibilizados no manual do usuário do software para uma areia média, apresentados na Tabela 16.

TABELA 16 – DADOS DE ENTRADA NO MODELO NUMÉRICO PARA CAMADA DRENANTE

Umidade volumétrica	Sucção matricial (kPa)
0,4400	0,08
0,4050	1,44
0,0671	9,92
0,0063	80,00
0,0027	281,00
0,0013	1176,00
0,0006	5230,00
0,0005	9501,00

Umidade volumétrica saturada	0,44
Coeficiente de permeabilidade saturado (m/min)	0,34861
FONTE: Adaptado de SoilVision (2019b).	

Em relação às condições iniciais, é possível inserir uma carga hidráulica ou poropressão de forma global ou por camada. Essa carga pode ser aplicada através de um valor constante, de uma malha de pontos ou através da inserção de nível freático. A condição inicial em uma análise de fluxo transiente direciona o ponto de início da análise numérica (SOILVISION, 2019b). Quando um nível freático é inserido, é possível escolher entre três opções a configuração de sucção para a camada não satura: sem máximo, constante acima do máximo e zero acima do máximo. O software considera uma distribuição hidrostática de poropressão acima do nível freático até a superfície. Na opção sem máximo, a poropressão negativa aumenta de maneira contínua; na opção constante acima do máximo, um valor é máximo é imposto e acima dele a poropressão se mantém constante; e para a última opção, atingindo o valor máximo escolhido a poropressão decresce até zero na superfície. A condição inicial foi imposta no modelo através de um valor constante, considerando a umidade inicial do solo, determinada a partir dos sensores de umidade, antes da primeira simulação de precipitação.

As condições de contorno definem quais fatores externos serão aplicados no modelo. Há três maneiras de inserir uma condição de contorno no módulo SVFLUX™GT: condição natural (ou condição de Neumann), condição essencial (ou condição de Dirichlet) e condição especial, que envolve as duas anteriores. Uma condição de contorno natural associada a uma equação diferencial parcial corresponde à quantidade de fluxo de água normal à superfície. Já a condição de contorno essencial está associada a uma carga hidráulica pré-determinada (SOILVISION, 2019a). A condição de contorno utilizada para simular a precipitação e evaporação foi a condição de Neumann, com aplicação de um fluxo proporcional à intensidade de tais fenômenos. O fenômeno da evaporação não é simulado de maneira direta nesse módulo do software e, portanto, foi aplicado como um fluxo negativo estimado de maneira simplificada conforme apresentado em 2.2. A Tabela 17 apresenta os valores de fluxo aplicados ao modelo para simulação da primeira precipitação simulada no modelo físico.

TABELA 17 – DADOS DE FLUXO APLICADO AO MODELO NUMÉRICO

Tempo (hora)	Fluxo (m³/h/m²)
0	0,105
0,5	0,105
0,505	-6,88E-05
96	-6,88E-05

Fonte: A autora (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a pesquisa.

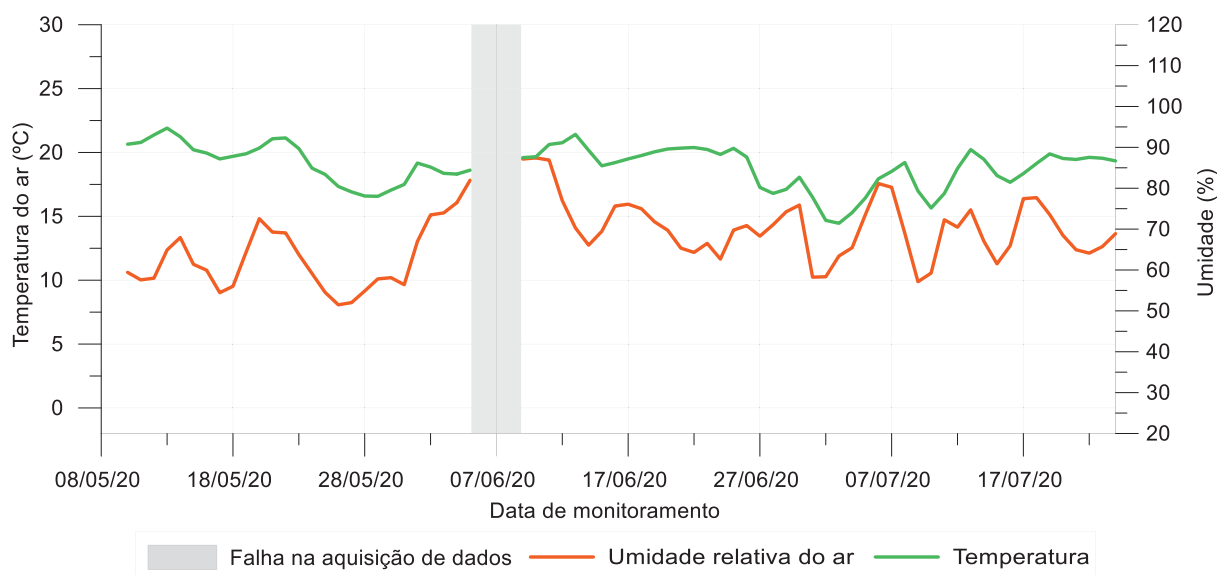
4.1 INSTRUMENTAÇÃO

Serão apresentados os dados de instrumentação obtidos ao longo do período de simulação e monitoramento. Os dados foram analisados entre 01/05/2020 e 31/07/2020. Foram realizadas 6 simulações de precipitação (Tabela 12), com intensidades variando entre 35 e 105 mm/h.

4.1.1 Sensor de umidade e temperatura do ar

O monitoramento do sensor de umidade e temperatura do ar DHT11 foi realizado entre 08/05/2020 e 24/07/2020. O período entre 05/06/2020 apresentou falha no registro dos dados em decorrência de falha no *datalogger*. A Figura 43 apresenta os dados de monitoramento de umidade relativa do ar e temperatura do ar registrados pelo sensor.

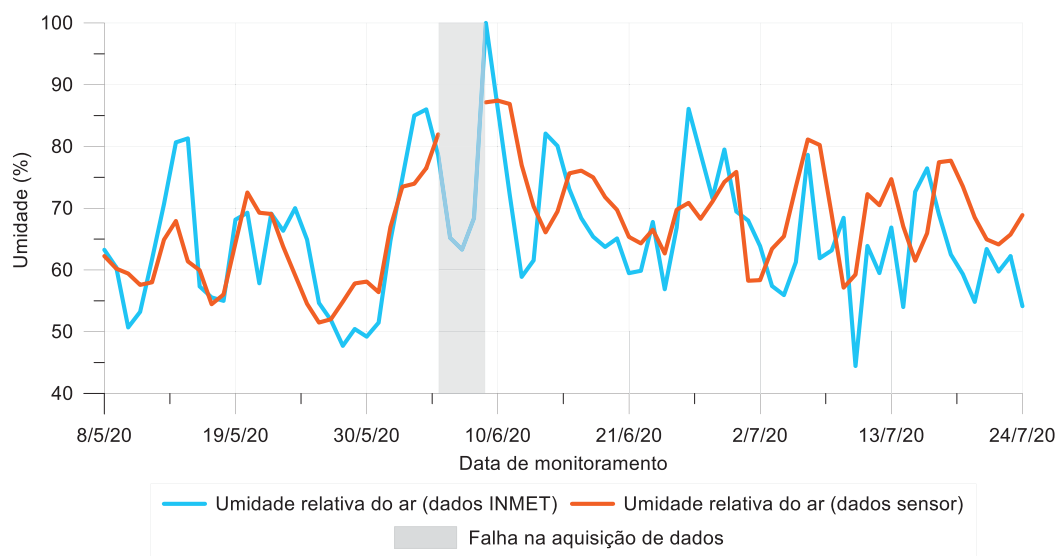
FIGURA 43 – DADOS DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR



Fonte: A autora (2020).

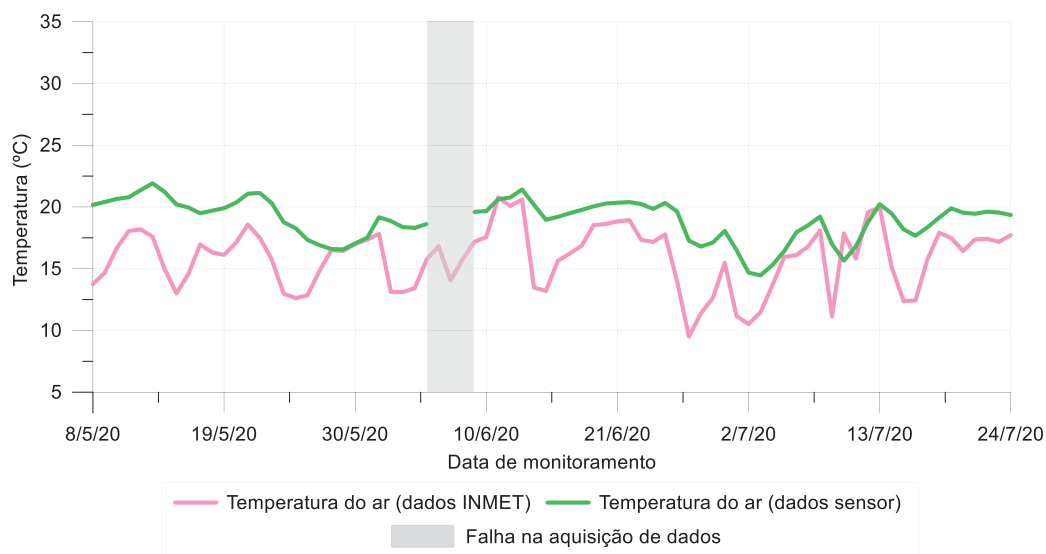
Para fins de validação e comparação dos resultados, analisaram-se os dados de umidade relativa do ar e de temperatura do ar registrados pelo sensor DHT11 em comparação com dados registrados por uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada em Curitiba. A Figura 44 apresenta as médias diárias dos dados para umidade relativa do ar e a Figura 45 apresenta as médias diárias dos dados para temperatura do ar.

FIGURA 44 – COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR REGISTRADOS PELO SENSOR E POR ESTAÇÃO METEOROLÓGICA (MÉDIAS DIÁRIAS)



Fonte: A autora (2020).

FIGURA 45 – COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE TEMPERATURA DO AR REGISTRADOS PELO SENSOR E POR ESTAÇÃO METEOROLÓGICA (MÉDIAS DIÁRIAS)

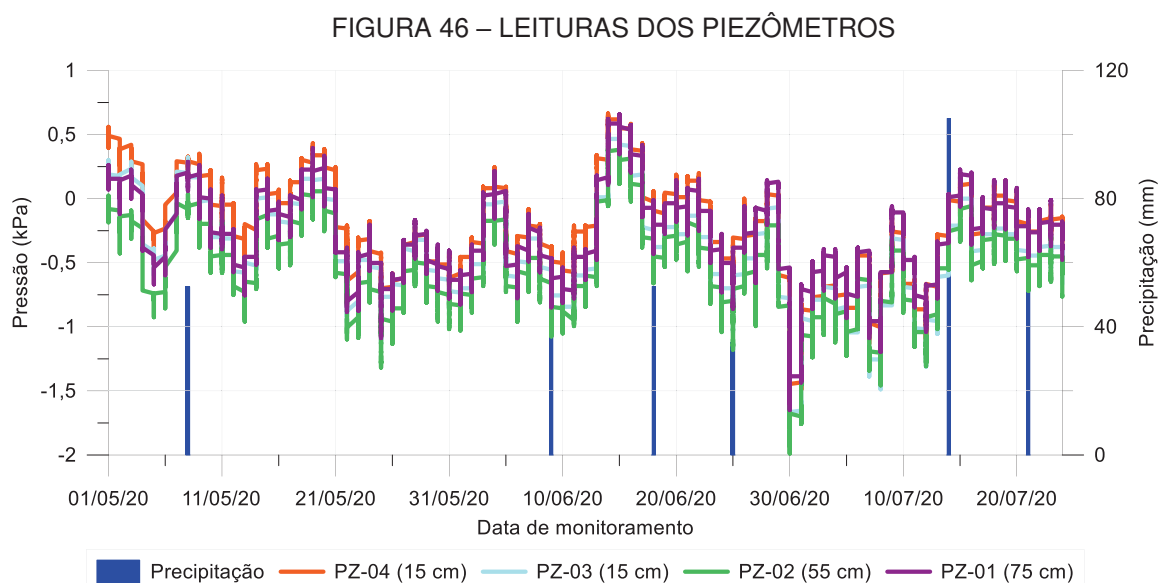


Fonte: A autora (2020).

Os resultados mostram uma boa aproximação dos dados registrados pelo sensor DHT11 e pela estação meteorológica. Em relação à umidade relativa do ar, os dados registrados pelo sensor apresentaram uma oscilação menor que os dados registrados pela estação e, em relação à temperatura, os dados registrados pelo sensor apresentaram valores ligeiramente superiores e, também, com menor oscilação. Por estar instalado em um ambiente fechado, é esperado que a umidade relativa do ar e a temperatura apresentem oscilações inferiores ao ambiente externo, além de uma temperatura superior.

4.1.2 Piezômetros elétricos

O monitoramento dos piezômetros elétricos de corda vibrante foi realizado entre 01/05/2020 e 24/07/2020. Os instrumentos foram instalados a 15 cm, 55 cm e 75 cm de profundidade. Os piezômetros PZ-03 e PZ-04 foram instalados na mesma profundidade (15 cm), entretanto com as pedras porosas posicionadas para cima e para baixo, respectivamente. O método de instalação com a pedra porosa posicionada para baixo é o método comum de instalação de um piezômetro elétrico, enquanto o método de instalação com a pedra porosa para cima é considerado por alguns profissionais como sendo mais adequado para o monitoramento das poropressões no solo. A Figura 46 apresenta as leituras dos sensores ao longo do período de monitoramento em comparação com as simulações de precipitação.



Fonte: A autora (2020).

Os dados oscilaram entre - 1,9 kPa e + 0,66 kPa. Os valores de poropressão negativa, sucção, foram muito inferiores ao esperado para o solo estudado, considerando os valores de umidade registrados e a curva de retenção de água do material determinada. Em relação à poropressão positiva, o valor máximo possível de registro era de 1,47 kPa para os sensores posicionados a 15 cm de profundidade; 5,39 kPa para o sensor posicionado a 55 cm de profundidade; e 7,35 kPa para o sensor posicionado a 75 cm de profundidade. Mesmo que os máximos valores possíveis sejam baixos, o valor máximo registrado pelo sensor não atingiu resultados esperados. Além disso, o comportamento da poropressão registrada pelos piezômetros não coincide com os perfis de umidade determinados pelos sensores de umidade.

Uma vez que o piezômetro de corda vibrante opera no princípio de oscilação do fio tensionado fixo ao diafragma sensível à pressão, é necessário que a região entre a pedra porosa e o diafragma esteja saturada para que as pressões atuantes sejam lidas corretamente. Quando o sensor está instalado abaixo do lençol freático, a água é forçada a entrar nos poros da pedra porosa, comprimindo o ar no espaço entre a pedra e o diafragma. Com o tempo, o ar é dissolvido na água, preenchendo o espaço completamente com água. Para agilizar esse processo de saturação, um procedimento é realizado previamente à instalação do sensor, conforme apresentado em 3.5.2.

O sensor utilizado possui pedra porosa comum e, portanto, ao ter contato com o solo em altos valores de sucções iniciais, perdeu saturação rapidamente. Essa dessaturação foi, possivelmente, a causa das leituras incorretas dos sensores, uma vez que o espaço entre a pedra porosa e o diafragma preenchido por ar não permite que o diafragma faça a correta leitura da poropressão. É possível que a saturação ocorra de forma independente quando o sensor está instalado abaixo do lençol freático, entretanto, no caso da instalação nessa pesquisa, a camada de solo acima da instalação do sensor permaneceu saturada por curtos períodos devido à infiltração da água para camadas mais profundas. Esse período não foi suficiente para permitir a saturação da pedra porosa novamente.

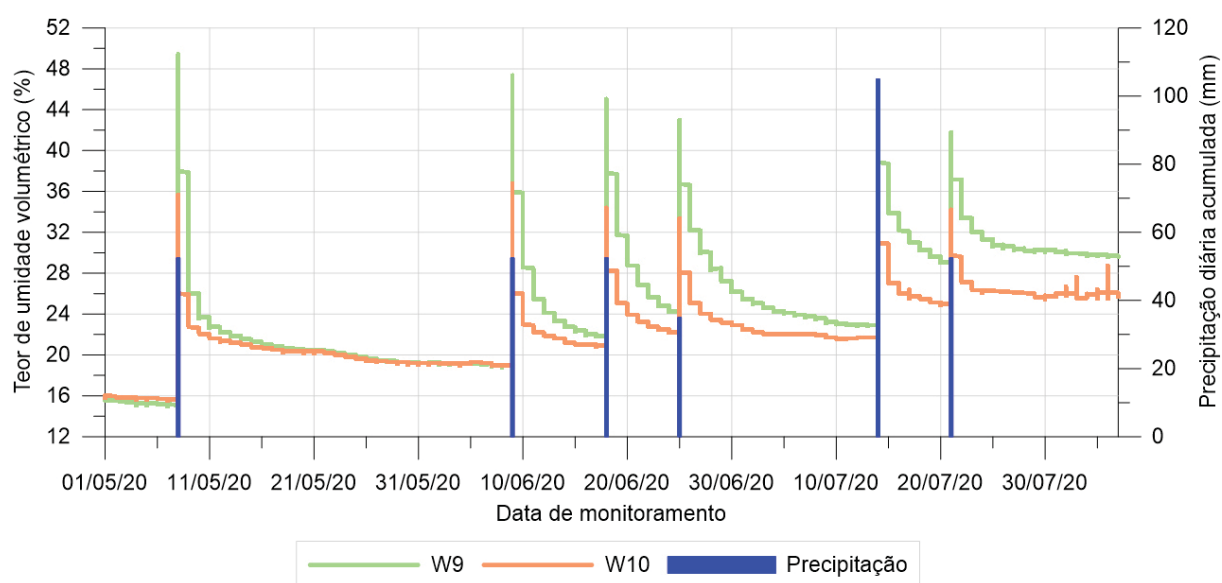
Em relação à poropressão negativa, duas questões levantaram discussão após a análise dos resultados: o método de instalação e o tipo de pedra porosa utilizada. A instalação foi realizada pelo método comum, em que o sensor é instalado em uma camada de areia, para evitar contato direto da pedra porosa com o solo. Por

tratar-se de um solo não saturado, entretanto, a utilização de um material com granulometria diferente em contato com o solo original ocasionou a perda da poropressão atuante. Para que o sensor pudesse registrar corretamente os valores de sucção, este deveria ter sido instalado em contato direto com o solo em que se desejava conhecer as poropressões negativas. Além do método de instalação, o tipo de pedra porosa poderia ser diferente para permitir registros mais precisos de sucção. A pedra porosa de alto valor de entrada de ar pode ser adquirida como um componente a parte da fabricante, com capacidades de 100 kPa e 200 kPa, e permitiria que o sistema se mantivesse saturado mesmo com sucção atuante.

4.1.3 Sensores de umidade

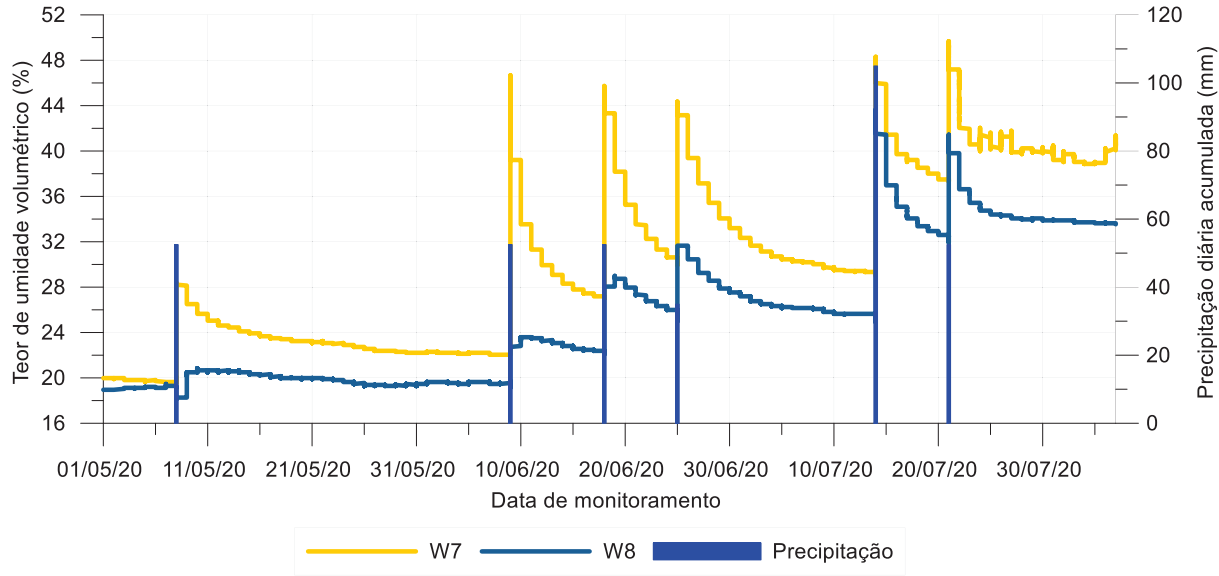
Os sensores de umidade foram monitorados entre 01/05/2020 e 31/07/2020, sem interrupções ou perda de dados ao longo do período de monitoramento. Os sensores foram identificados de forma crescente do mais profundo para o mais superficial e com números ímpares para a posição esquerda da caixa e pares para a posição direita. As figuras abaixo apresentam os dados de monitoramento dos sensores de umidade por profundidade e em comparação aos dados das simulações de precipitação.

FIGURA 47 – MONITORAMENTO DOS SENSORES DE UMIDADE INSTALADOS A 5 CM DE PROFUNDIDADE



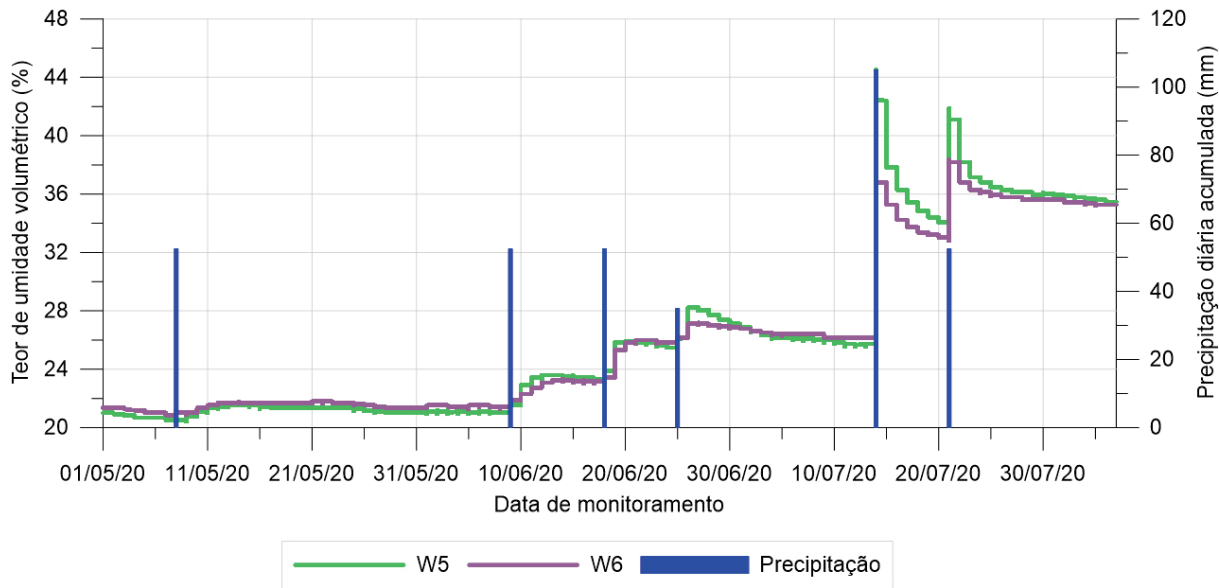
Fonte: A autora (2020).

FIGURA 48 – MONITORAMENTO DOS SENSORES DE UMIDADE INSTALADOS A 15 CM DE PROFUNDIDADE



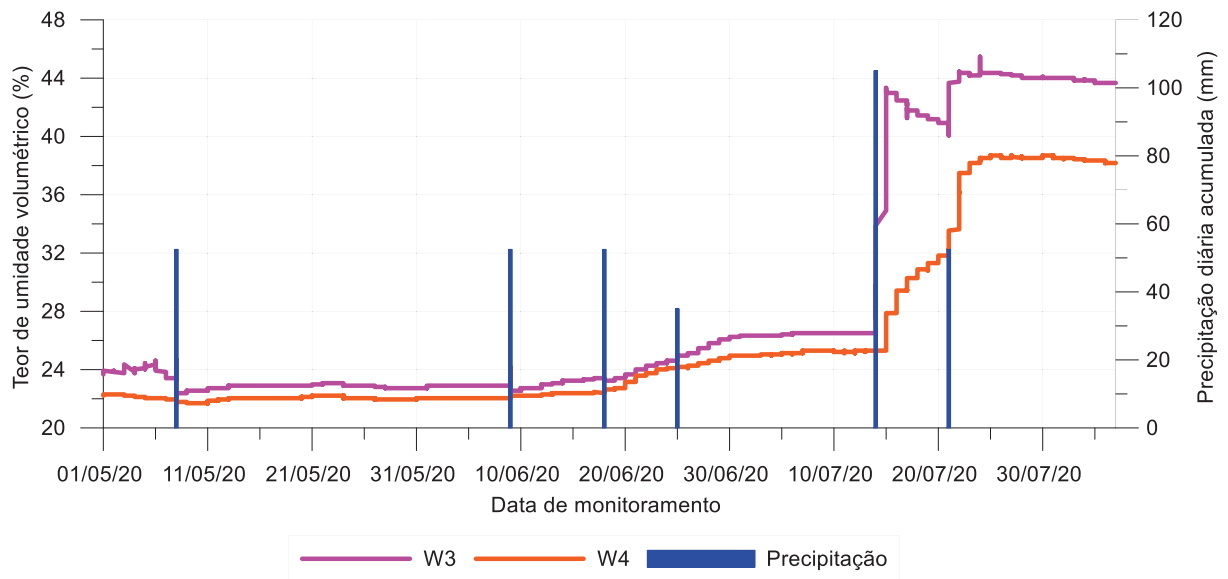
Fonte: A autora (2020).

FIGURA 49 – MONITORAMENTO DOS SENSORES DE UMIDADE INSTALADOS A 35 CM DE PROFUNDIDADE



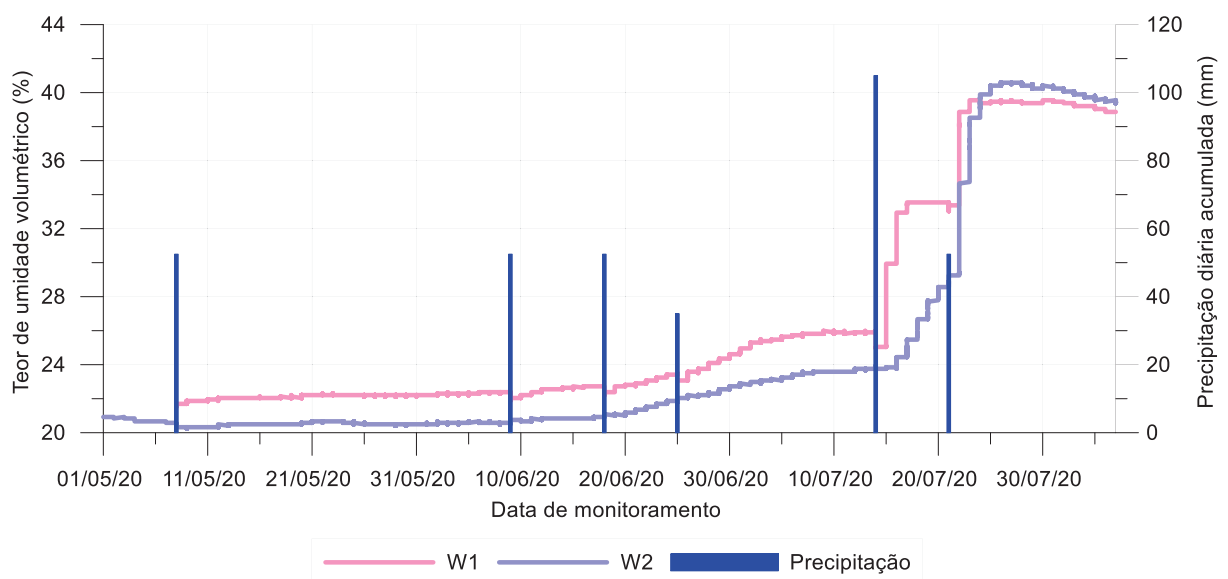
Fonte: A autora (2020).

FIGURA 50 – MONITORAMENTO DOS SENSORES DE UMIDADE INSTALADOS A 55 CM DE PROFUNDIDADE



Fonte: A autora (2020).

FIGURA 51 – MONITORAMENTO DOS SENSORES DE UMIDADE INSTALADOS A 75 CM DE PROFUNDIDADE



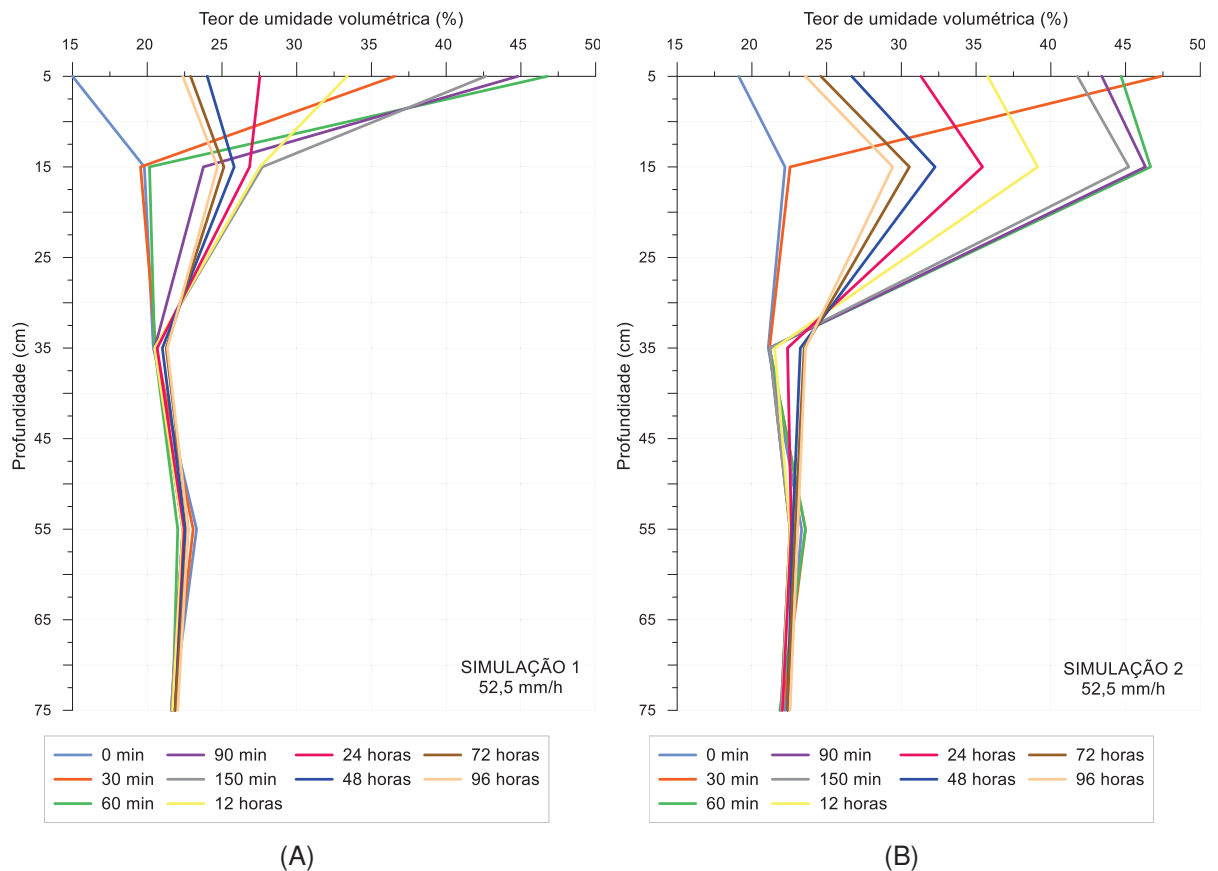
Fonte: A autora (2020).

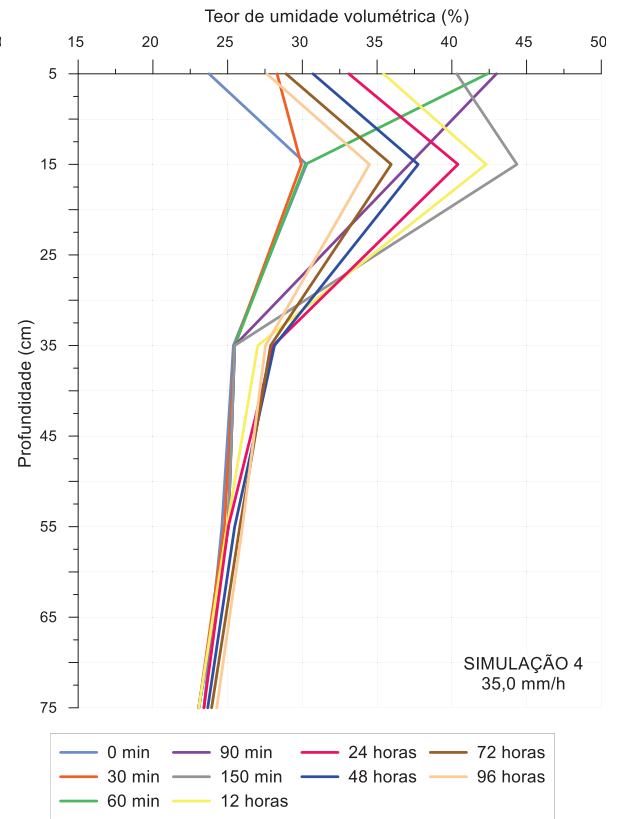
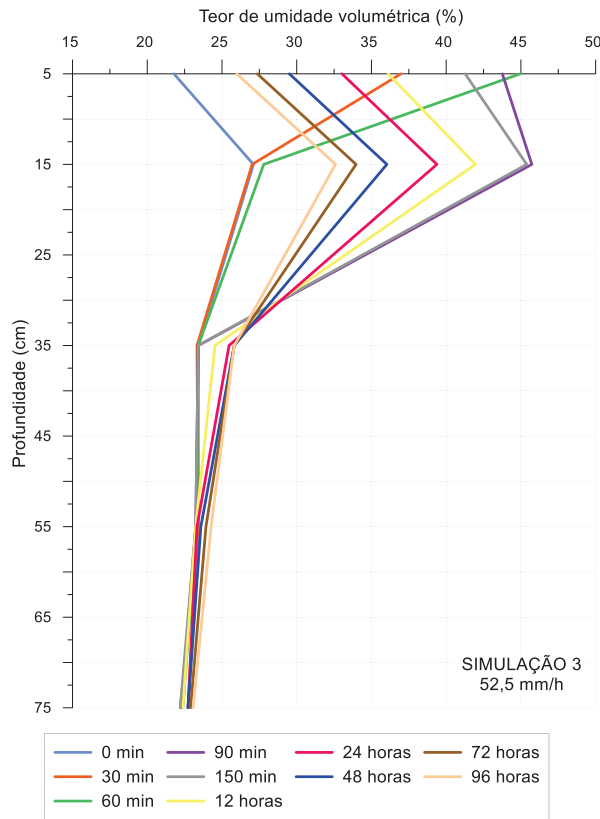
Os sensores instalados à esquerda da caixa apresentaram, em geral, valores de umidade superiores aos sensores da direita. Conforme apresentado em 3.3, o índice de vazios resultante do processo de compactação do solo foi ligeiramente superior para o lado esquerdo (1,29 em comparação a 1,27). Essa propriedade possui influência no teor volumétrico de água do solo na condição de saturação, uma vez que

quanto maior o índice de vazios do solo, maior o volume de água que o solo é capaz de absorver e, portanto, esse fato pode justificar a diferença obtida entre os máximos teores de umidade registrados pelos sensores a uma mesma profundidade de instalação.

Os dados dos sensores permitiram avaliar a infiltração de água em função de cada simulação de precipitação. Para isso, foram determinados perfis de umidade para cada simulação, nos tempos 0 min, 30 min, 60 min, 90 min, 150 min, 12 horas, 24 horas, 48 horas, 72 horas e 96 horas após o início de cada simulação. A Figura 52 apresenta os perfis de umidade para cada simulação de precipitação, considerando os sensores posicionados no lado esquerdo do modelo físico (W1, W3, W5, W7 e W9) e a Figura 53 apresenta os perfis de umidade para as simulações de precipitação considerando os sensores posicionados no lado direito do modelo físico (W2, W4, W6, W8 e W10).

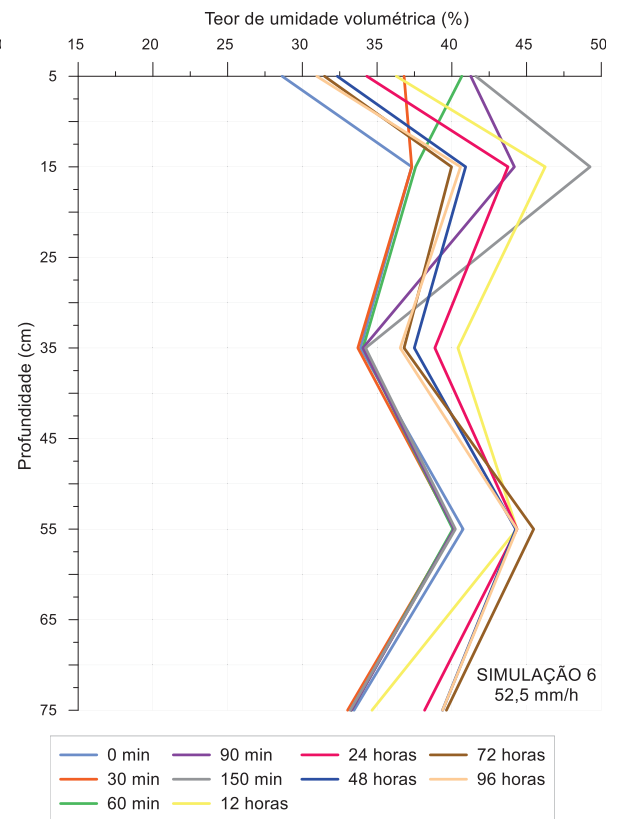
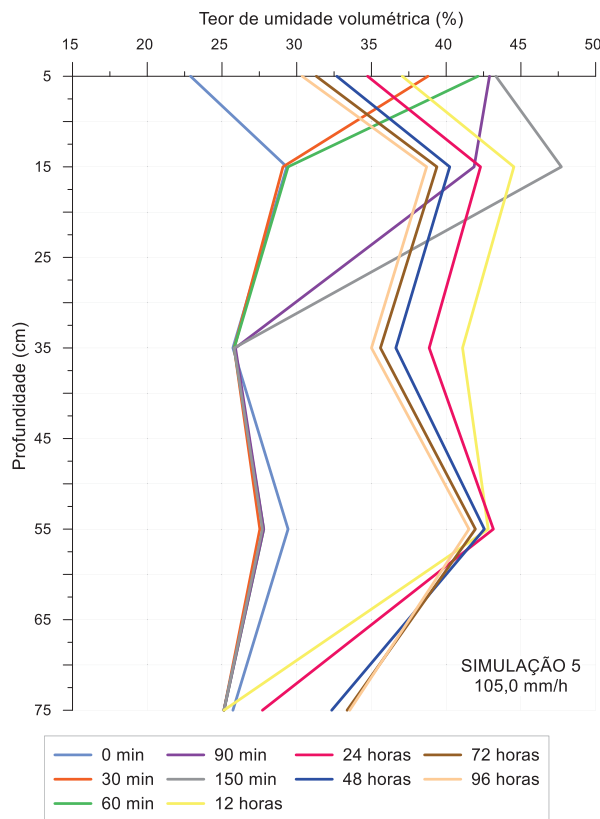
FIGURA 52 – PERFIS DE UMIDADE PARA OS SENSORES POSICIONADOS NO LADO ESQUERDO: (A) SIMULAÇÃO 1; (B) SIMULAÇÃO 2; (C) SIMULAÇÃO 3; (D) SIMULAÇÃO 4; (E) SIMULAÇÃO 5; (F) SIMULAÇÃO 6





(C)

(D)

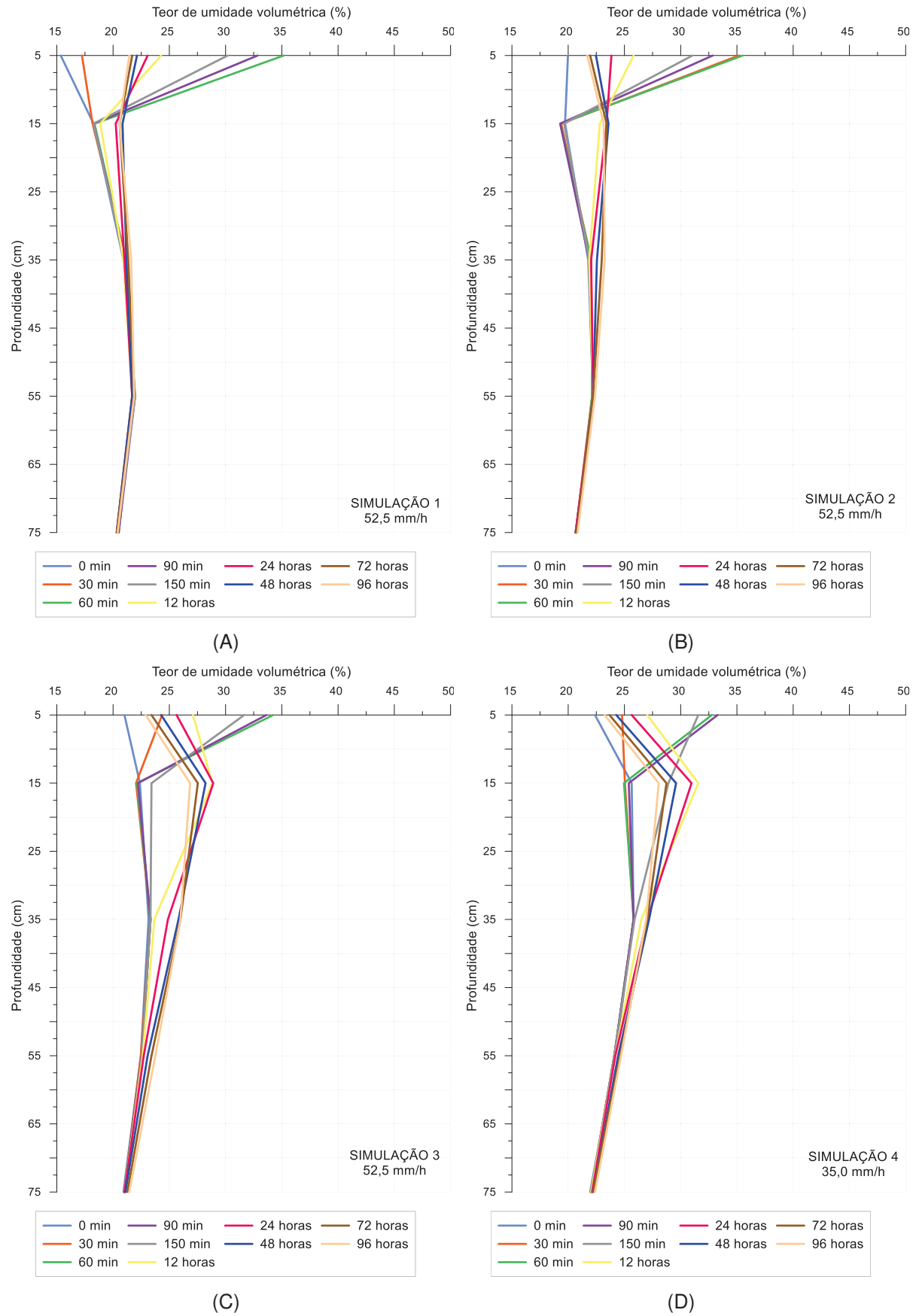


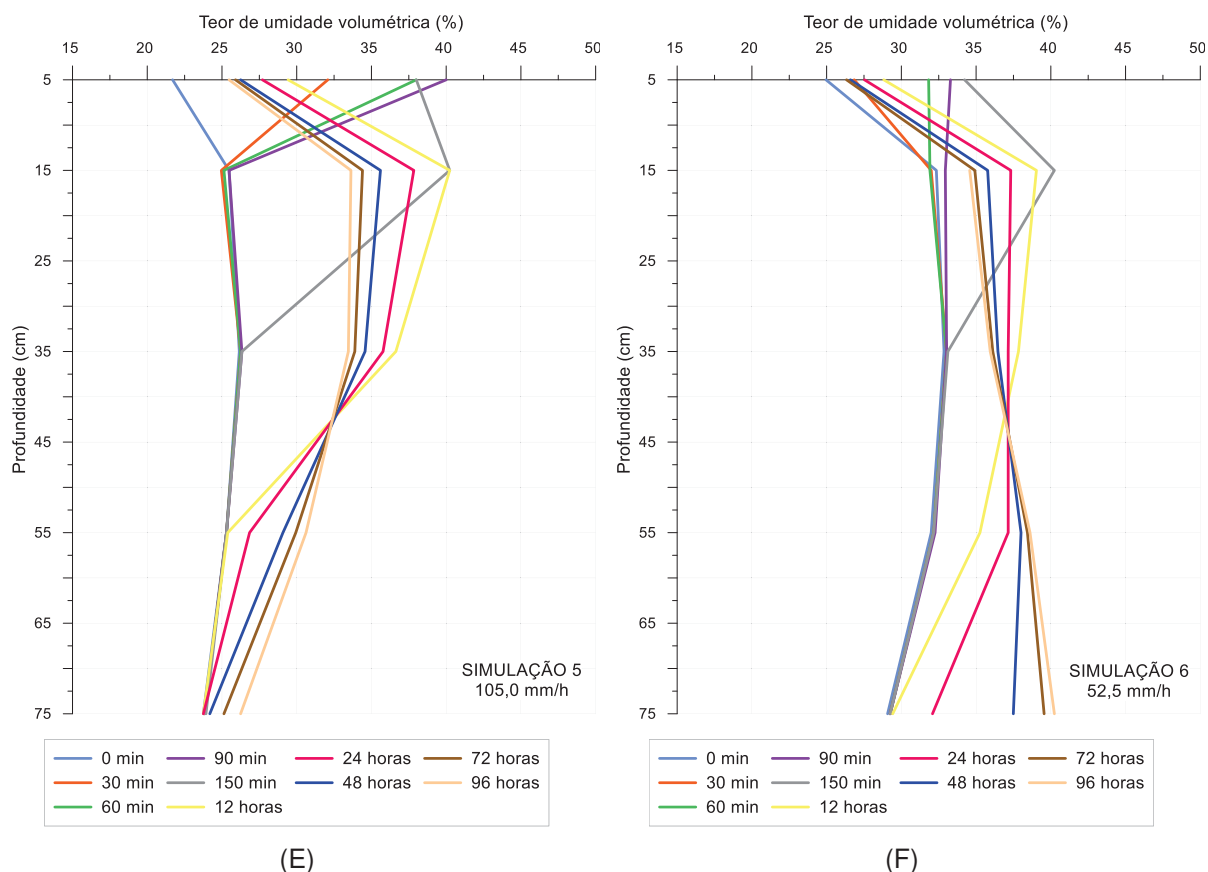
(E)

(F)

Fonte: A autora (2020).

FIGURA 53 – PERFIS DE UMIDADE PARA OS SENSORES POSICIONADOS NO LADO DIREITO: (A) SIMULAÇÃO 1; (B) SIMULAÇÃO 2; (C) SIMULAÇÃO 3; (D) SIMULAÇÃO 4; (E) SIMULAÇÃO 5; (F) SIMULAÇÃO 6





Para a profundidade de 5 cm, independente da intensidade e duração da precipitação, a variação da umidade inicial foi significativa tanto para os sensores localizados no lado esquerdo quanto para os sensores localizados no lado direito do modelo físico. O tempo de resposta dos sensores para atingir o máximo teor de umidade foi de 60 minutos para a primeira simulação e reduziu para 30 minutos na segunda simulação para todos os sensores nessa profundidade. Já para os sensores instalados a 15 cm de profundidade, a primeira simulação de precipitação apresentou baixa variação de umidade. A frente de umedecimento avançou até 15 cm, entretanto o volume de água que atingiu a profundidade não foi suficiente para ocasionar uma variação significativa. O tempo de resposta para a primeira simulação foi de 150 minutos para os sensores localizados no lado esquerdo e de 24 horas para os sensores localizados no lado direito. Para a simulação seguinte, o tempo de resposta reduziu para 60 minutos e 12 horas, respectivamente.

Os sensores instalados a 35 cm não registraram avanço da frente de umedecimento para a primeira simulação de precipitação. Para as simulações 2, 3 e 4, entre 48 e 96 horas após o início das precipitações, variações nos teores volumétricos de água inferiores a 3% foram observadas. Até a simulação 4 não foram

observadas relações entre intensidade e duração da precipitação e avanço da frente de umedecimento. Apenas após a simulação 5, com precipitação de maior intensidade e duração, é que foram observadas variações significativas nos teores de umidade.

Para os sensores instalados a 55 e 75 cm de profundidade, o comportamento foi similar. Variações significativas de umidade foram observadas apenas após a simulação de 105 mm/h de intensidade. Ouve uma pequena variação de umidade resultado das simulações anteriores, demonstrando que a frente de umedecimento atingiu as camadas mais profundas de solo mesmo para precipitações de menor intensidade, entretanto, a variação foi pouco significativa em comparação à simulação de maior intensidade. A simulação final, de 65 mm/h, resultou numa variação de umidade superior às simulações iniciais de mesma intensidade.

Observou-se em todos os sensores que o tempo de resposta para a primeira simulação que ocasionou variação significativa de umidade foi superior ao tempo de resposta para a simulação seguinte. Esse comportamento pode ser justificado pela função de condutividade hidráulica, a qual determina que quanto menor o teor de umidade e maior a sucção do solo, menor a sua permeabilidade não saturada. Quanto mais próximo o solo se encontrar da saturação, maior será a velocidade de percolação.

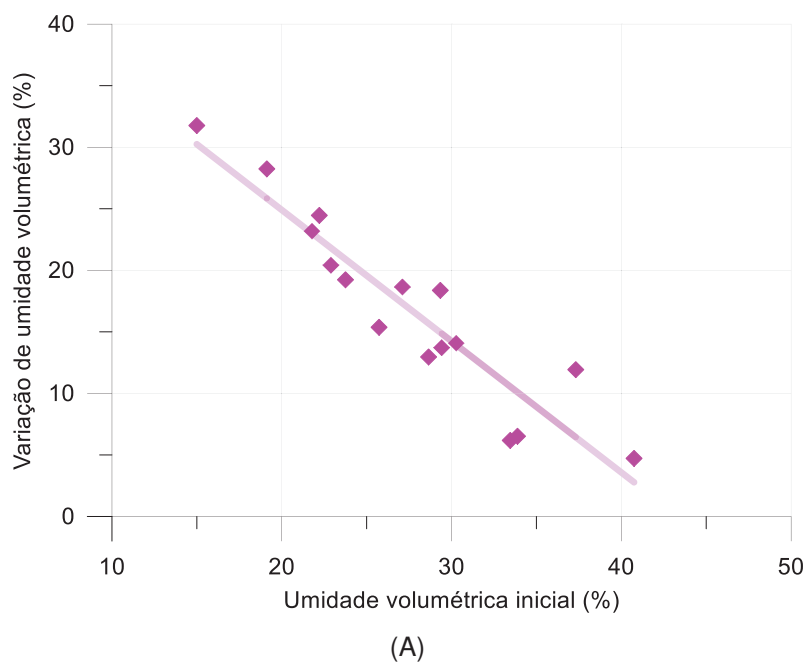
Para os sensores a partir de 35 cm de profundidade, as variações de umidade mais significativas ocorreram apenas após a precipitação de 105 mm/h. Isso indica que o volume de precipitação possui grande influência no avanço da frente de umedecimento. As simulações anteriores, entretanto, tiveram influência nesse resultado, pois possibilitaram o aumento do teor de umidade da camada mais superficial e, portanto, o aumento da velocidade de escoamento nessa camada. Após a variação ocasionada pela precipitação de 105 mm/h de intensidade, a precipitação de 52,2 mm/h de intensidade atingiu as camadas mais profundas e ocasionou variação na umidade do solo.

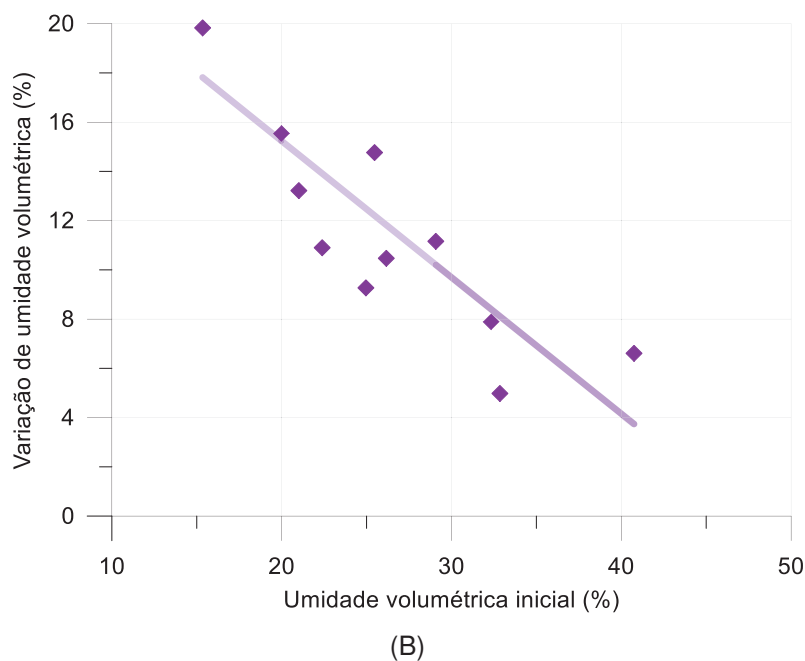
Dentre os resultados observados, o mais consistente foi a relação entre o teor de umidade volumétrico inicial e a variação de umidade volumétrica. A Figura 54 apresenta os dados obtidos para os sensores posicionados no lado esquerdo e direito do modelo físico, correlacionando a umidade volumétrica inicial e a variação de umidade volumétrica após uma simulação. Para os sensores posicionados no lado esquerdo, a dispersão dos dados foi menor, o que pode ser resultado da melhor homogeneização obtida no processo de compactação nessa região. Entretanto, para

ambas as situações a relação é muito próxima à linear. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,871 para os dados apresentados no gráfico (A) e de 0,723 para os dados apresentados no gráfico (B).

A relação entre teor de umidade inicial e variação da umidade, aliada aos tempos de resposta observados nos sensores de umidade, indica que a umidade inicial do solo tem influência tanto na variação de umidade quanto no tempo em que a água leva para preencher os vazios do solo a partir de uma precipitação. Em termos de sucção, quanto maior a sucção inicial, maior será a variação de sucção para uma mesma intensidade de precipitação e maior o tempo para que isso ocorra. Nesse caso, um elevado volume de precipitação é necessário para que haja variações significativas de umidade quando o solo se encontra num estado de baixa umidade. Além disso, o volume acumulado de precipitação possui influência na velocidade de infiltração, resultado da função de condutividade. Em cenários de umidade superior, a velocidade de infiltração diminui e o volume de precipitação para ocasionar uma variação significativa é inferior. Resultados semelhantes foram obtidos por Rianna et al. (2014) em um modelo físico sujeito à precipitação natural.

FIGURA 54 – TEOR DE UMIDADE INICIAL E VARIAÇÃO DA UMIDADE: (A) SENSORES POSICIONADOS NO LADO ESQUERDO E (B) SENSORES POSICIONADOS NO LADO DIREITO

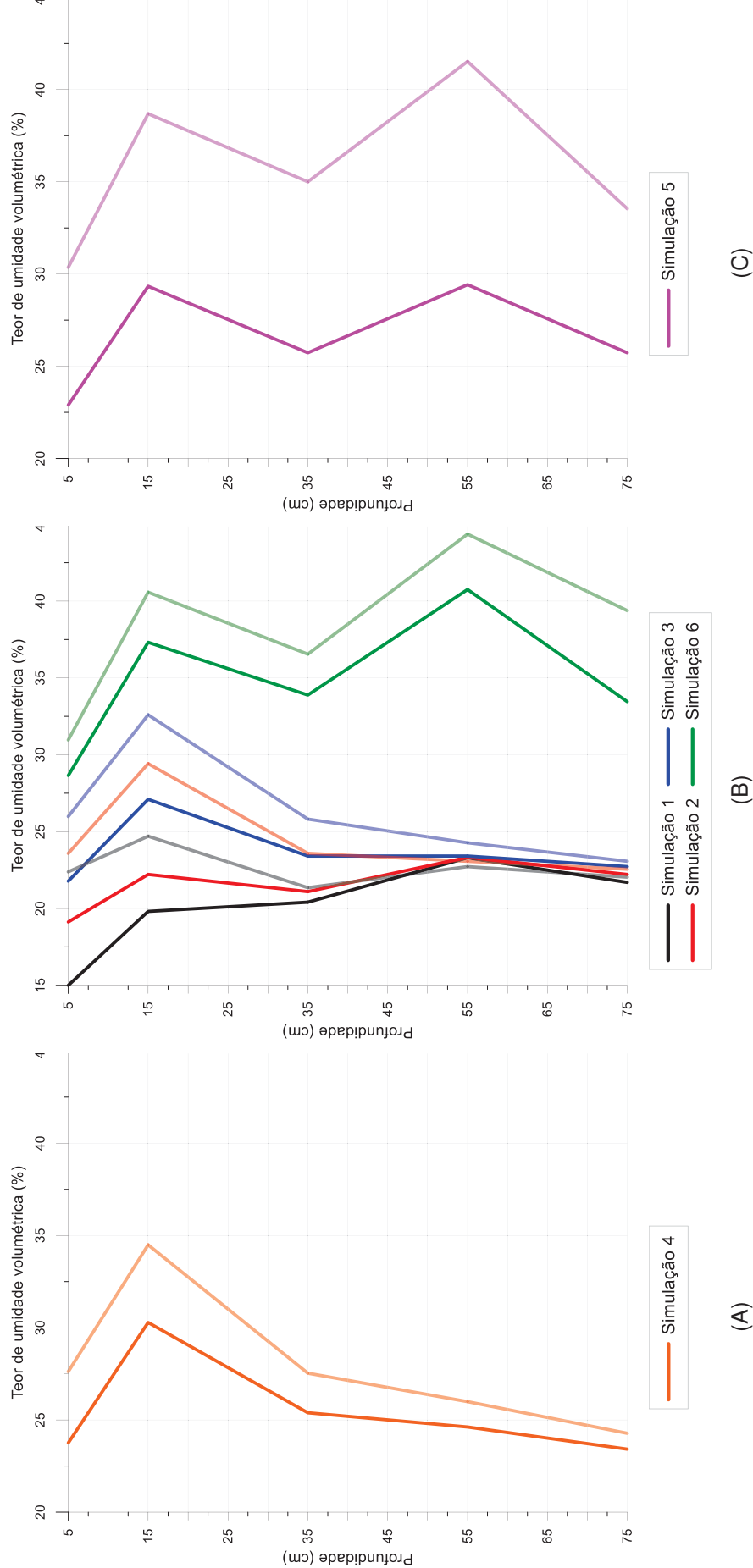




Fonte: A autora (2020).

Para a intensidade da precipitação observou-se relação entre a intensidade de uma chuva e o término de sua influência na infiltração do solo. A Figura 55 apresenta os perfis de umidade inicial e após 96 horas da simulação para as intensidades de 35 mm/h, 52,5 mm/h e 105 mm/h. Nos gráficos, a linha de cor mais intensa representa a o perfil de umidade inicial e a linha de cor menos intensa apresenta o perfil de umidade final. Para as intensidades de 35 e 52,5 mm/h, resultados de precipitações de 20 e 30 minutos de duração, respectivamente, 96 horas após a aplicação da chuva, o perfil de umidade se aproxima do perfil inicial. Há ainda alguma influência resultado da simulação, entretanto, há uma boa recuperação dos valores de teor de umidade volumétrica e, como consequência, sucção. Para a simulação de 105 mm/h, resultado da aplicação de chuva durante 60 minutos, o conteúdo de água no solo após 96 horas da simulação é alto e muito divergente do inicial, indicando a influência da intensidade da precipitação na recuperação das condições iniciais de umidade do solo.

FIGURA 55 – PERFIL DE UMIDADE INICIAL E APÓS 96 HORAS PARA PRECIPITAÇÃO COM INTENSIDADE DE: (A) 35 MM/H; (B) 52,5 MM/H; (C) 105 MM/H



4.2 ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO REAL

A estimativa da evaporação real foi realizada a fim de simular numericamente o fluxo de evaporação atuante. Foram utilizadas as equações de radiação líquida proposta por Penman (1948) e de evaporação real proposta por Wilson (1990). Algumas considerações foram realizadas para o cálculo da radiação líquida, de acordo com a Equação (14) e estão apresentadas na Tabela 18 junto ao resultado obtido.

TABELA 18 – CONSIDERAÇÕES REALIZADAS PARA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO LÍQUIDA

Descrição	Variável	Valor considerado	Fonte
Radiação solar para uma atmosfera completamente transparente	R_a	14,2 MJm ⁻²	Tiba et al., 2000
Coeficiente de reflexão	r	0,32	Silva et al., 2005
Constante de Stefan-Boltzmann	τ	5,67E-8 Wm ⁻² k ⁻⁴	Silva et al., 2005
Razão entre horas de sol real/possível	n/M	0	Considerado
Temperatura do ar	T_a	19 °C	Instrumentação
Temperatura da água na superfície	T_s	19 °C	Considerado
Umidade do ar	U_a	63 %	Instrumentação
Pressão de vapor do ar acima da superfície de evaporação	e_a	0,94 kPa	Calculado
Radiação líquida	Q_n	1,65 mm/dia	Calculado

Fonte: A autora (2020).

Considerou-se a razão entre horas de sol real e possível como nula, pois o modelo físico está instalado dentro de um laboratório, sem radiação solar direta. Outra variável necessária à estimativa da radiação líquida é a pressão de vapor do ar acima da superfície de saturação, a qual foi estimada de acordo com as proposições de Tetens (1930) apresentadas por Tran (2013). A pressão de vapor é função da temperatura da água na superfície e umidade do ar, valores obtidos com o sensor de umidade e temperatura do ar. A temperatura da água na superfície foi considerada igual à temperatura do ar.

Considerações também foram realizadas para o cálculo da evaporação real, de acordo com a Equação (15). A Tabela 19 apresenta as considerações realizadas para estimativa da evaporação real e o resultado obtido.

TABELA 19 – CONSIDERAÇÕES REALIZADAS PARA ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO REAL

Descrição	Variável	Valor considerado	Fonte
Tangente à curva de pressão de vapor de água no ponto temperatura média do ar	Γ	0,04 (kPa/°C)	Calculado
Radiação líquida	Q_n	1,65 mm/dia	Calculado
Velocidade do vento	V	0	Considerado
Termo evaporativo aerodinâmico	E_a	0,205 mm/dia/Pa	Calculado
Constante psicrométrica	η	0,06078 kPa/°C	Tran, 2013
Evaporação real	AE	0,64 mm/dia	Calculado

Fonte: A autora (2019).

A tangente à curva de pressão de vapor de água no ponto da temperatura média do ar foi estimada de acordo com equação proposta por Tetens (1930) apresentada por Tran (2013). A velocidade do vento foi considerada nula, pois o modelo está instalado em ambiente fechado.

A evaporação foi calculada para todos os dados de umidade e de temperatura do ar registrados pelo sensor. Os resultados, entretanto, oscilaram entre 0,58 e 0,64 mm/dia, pois o parâmetro que apresenta maior influência nas equações utilizadas é a radiação líquida, função das horas de sol incidente no solo.

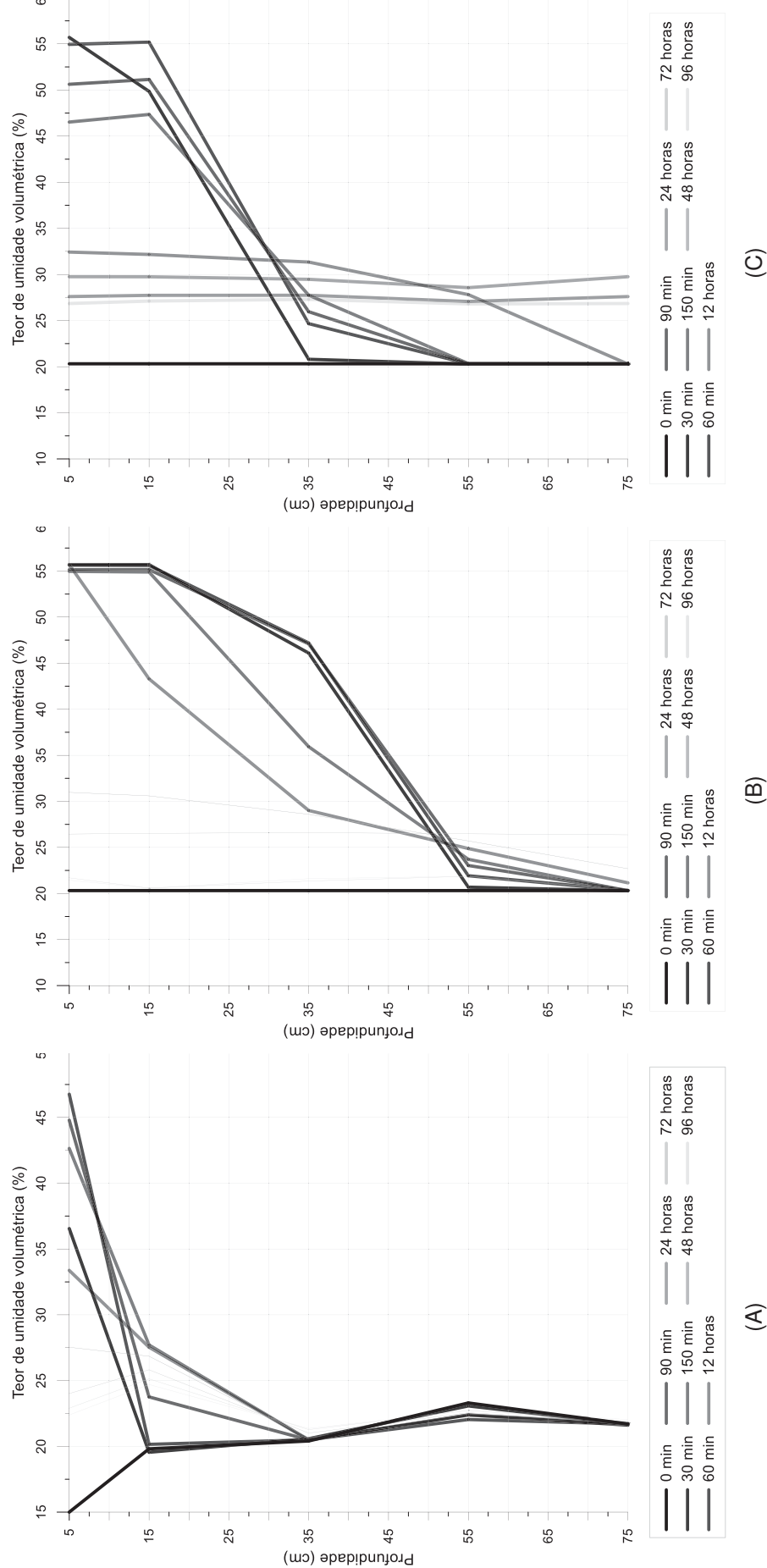
4.3 MODELO NUMÉRICO

A primeira simulação de precipitação realizada no modelo físico foi uma precipitação de intensidade 52,5 mm/h em uma condição inicial do solo de aproximadamente 20% de umidade. O resultado da simulação foi avaliado até 96 horas depois da aplicação da chuva artificial.

Para o modelo numérico essa mesma condição foi aplicada, considerando a modelagem do solo com as duas funções de condutividade hidráulica determinadas, pela equação proposta por Leong e Rahardjo (1997) e pelo método do perfil instantâneo.

A Figura 56 apresenta os resultados obtidos na simulação numérica para as duas funções de condutividade aplicadas em comparação com os resultados obtidos no modelo físico para a mesma intensidade de precipitação simulada numericamente.

FIGURA 56 – PERFIS DE UMIDADE: (A) MODELO FÍSICO; (B) MODELO NUMÉRICO UTILIZANDO LEONG E RAHARDJO (1997); (C) MODELO NUMÉRICO UTILIZANDO PERFIL INSTANTÂNEO



Pela análise dos gráficos é clara a diferença obtida para as simulações numéricas em comparação com os resultados da instrumentação. O teor de umidade volumétrica máximo atingido através do modelo numérico é função do parâmetro de entrada do modelo, o qual poderia ser facilmente ajustado. O avanço da frente de umedecimento, entretanto, é função tanto da curva de retenção quanto da função de condutividade hidráulica, parâmetros difíceis de obter com precisão em laboratório,

Utilizando a equação proposta por Leong e Rahardjo (1997), a frente de umedecimento atingiu a profundidade de 35 cm nos primeiros 30 minutos após a simulação, com uma variação de umidade significativa. As camadas de 5 e 15 cm atingiram a saturação e recuperaram totalmente a umidade inicial após as 96 horas do início da precipitação. As camadas de 55 e 75 cm apresentaram variação de umidade, entretanto as variações foram baixas.

Pelo método do perfil instantâneo, a profundidade de 35 cm apresentou aumento no teor de umidade após 60 minutos do início da simulação, entretanto a variação para essa camada foi inferior. As camadas de 5 e 15 cm atingiram a saturação e sofreram redução de umidade, atingindo equilíbrio hidráulico em 27% de umidade após 96 horas do início da simulação. As camadas de 55 e 75 cm de profundidade apresentaram aumento no teor de umidade após 72 horas do início da simulação e atingiram o equilíbrio hidráulico em 27% de umidade ao fim da simulação numérica.

Em comparação com os dados dos sensores, os modelos numéricos apresentaram resultados divergentes, não somente em valores, mas em simular o comportamento da infiltração no solo. A dificuldade encontrada para determinar a função de condutividade hidráulica a partir dos modelos matemáticos propostos é uma das justificativas para essa divergência resultante. Os resultados obtidos pelo método do perfil instantâneo apresentaram comportamento mais similar ao registrado pela instrumentação. A diferença apresentada pelos dois modelos demonstra a importância da correta determinação desse parâmetro para análises de fluxo em solos não saturados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de simulação de precipitação desenvolvido é simples e funcional. Apesar das limitações, apresentou boa uniformidade para a área em que os sensores foram instalados e permitiu simular precipitações condizentes com cenários de deslizamentos de terra.

Em relação à instrumentação, o sensor de umidade e temperatura do ar utilizado apresentou bons resultados se comparados à de uma estação meteorológica. O sensor é de baixo custo e uma boa alternativa para utilização em pesquisas acadêmicas. O piezômetro elétrico de corda vibrante, entretanto, não foi adequado para a pesquisa. Além de apresentar um range muito alto se comparado aos pequenos valores de poropressão desenvolvidos no modelo físico, a pedra porosa utilizada não é adequada para leituras de sucção. Para permitir que o sensor registre valores de poropressão negativa, é recomendável utilizar uma pedra porosa com alto valor de entrada de ar, caso contrário o sistema perde a saturação e a leitura não é confiável. Além disso, o método de instalação não foi adequado para leituras de sucção. A instalação do sensor seguiu o método comum, em que a pedra porosa é posicionada em camada de areia. Entretanto, a diferença de granulometria entre o solo estudado e a areia ocasiona a não representatividade da poropressão negativa atuante na areia.

Apesar do baixo número de simulações realizadas, os resultados dos sensores de umidade permitiram concluir algumas relações entre a precipitação e a variação da umidade, a qual está intimamente ligada ao parâmetro de sucção. Os sensores posicionados na porção esquerda do modelo físico apresentaram resultados mais consistentes e menos dispersos, função da melhor homogeneização obtida com o processo de compactação no centro e lado esquerdo e, portanto, as conclusões foram baseadas nesses dados.

Em relação ao avanço da frente de umedecimento, a variação da umidade na camada mais superficial, de 5 cm, aconteceu após a primeira simulação de precipitação. Para as camadas mais profundas, principalmente a partir de 35 cm, variações significativas de umidade aconteceram apenas após um acumulado de 225,5 mm de precipitação e para uma precipitação de intensidade elevada, 105 mm/h. Para todos os sensores, a primeira variação significativa de umidade aconteceu em um tempo maior que a segunda variação, resultado da relação entre permeabilidade não saturada e sucção.

Em termos práticos, a primeira variação significativa de umidade ao longo da profundidade estaria relacionada a um período seco. Dessa forma, pode-se concluir que em períodos sem precipitação, com umidade do solo abaixo de 25% de umidade, é necessário um volume considerável de chuva para que haja variações significativas de sucção em profundidade e o tempo para que essa variação ocorra é elevado. Já para períodos chuvosos, que mantenham o teor de umidade do solo acima de 25%, o volume necessário para que haja variações é inferior, assim como o tempo para que ocorra variação da sucção em profundidade. A realização de mais simulações com monitoramento contínuo permitiria identificar os níveis de sucção e de armazenamento de água relacionados a esses cenários.

Em relação à intensidade da precipitação, observou-se a influência desse parâmetro no tempo de recuperação das condições iniciais do solo após a simulação. Para as simulações de 35 e 52,5 mm/h de intensidade, após 96 horas da simulação o perfil de umidade se aproximou do perfil inicial. Para a precipitação de 105 mm/h de intensidade, aplicada durante 60 minutos, entretanto, o perfil de umidade final apresentou valores bastante superiores ao inicial. Nota-se, portanto, que a intensidade possui relação com o tempo de influência de uma precipitação no teor de umidade do solo. Para as simulações realizadas nessa pesquisa, as chuvas de elevada intensidade ocasionaram alterações no teor volumétrico de água e na sucção que permaneceram por tempo superior a 96 horas após o fim de sua ocorrência.

Por fim, em relação aos modelos numéricos, a dificuldade encontrada para determinar a função de condutividade hidráulica para solos com comportamento bimodal resultou em um modelo numérico que não simulou corretamente o comportamento do solo frente à precipitação. O modelo utilizando a função de condutividade determinada pelo método do perfil instantâneo apresentou resultados mais próximos aos dados de instrumentação e, dessa forma, conclui-se que esse método pode ser uma solução para determinar a permeabilidade não saturada do solo quando há dados de umidade em profundidade. O método, que é usualmente aplicado nas ciências do solo e agronomia, pode ser utilizado em análises geotécnicas quando houver necessidade.

5.1 LIMITAÇÕES

As limitações envolvendo modelo físico são, em geral, relacionadas à representatividade do modelo na simulação das condições reais de campo. Apesar do controle de compactação utilizado, sabe-se que ao utilizar amostras deformadas de solo, as propriedades e comportamentos do solo natural se alteram. Além disso, o sistema de simulação de precipitação não representa de forma idêntica uma precipitação natural e o fenômeno da evaporação ocorre de forma minimizada dentro de um espaço fechado de laboratório. Os equipamentos comerciais também possuem suas limitações em relação à confiabilidade dos resultados, o que pode ocasionar uma interpretação incorreta dos dados.

Para minimizar os efeitos dessas limitações, buscou-se conhecer as propriedades do solo após a compactação e controlar ao máximo todas as variáveis envolvidas no processo.

O número de simulações realizado é, também, fator limitante dessa pesquisa. Foram observados alguns padrões no comportamento do solo frente às simulações, entretanto, para obtenção de resultados mais consistentes um número maior de simulações é necessário.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A relação entre a precipitação e os perfis de umidade do solo é fundamental para determinação da estabilidade de encostas frente a cenários de chuvas intensas. O uso de modelos físicos para esse estudo permite realizar simulações variadas e em condições controladas, embasando a tomada de decisões em campo.

Dessa forma, sugerem-se para trabalhos futuros:

- a) Realizar simulações com monitoramento contínuo para cenários de precipitação que permitam identificar limites de umidade e sucção relacionados à deflagração de movimentos de massa;
- b) utilizar de sensores capazes de monitorar a sucção a fim de validar os resultados da curva de retenção de água;
- c) realizar simulações em superfície com inclinação, a fim de incluir o escoamento superficial de água como parâmetro de análise da infiltração;

- d) definir uma função de condutividade hidráulica para o solo capaz de simular numericamente os resultados obtidos com instrumentação.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante. Rio de Janeiro, 1995.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016d.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016e.
- ABUDI, I; CARMÍ, G; BERLINER, P. Rainfall simulator for field runoff studies. **Journal of Hydrology**, v. 454, p. 76-81, 2012.
- AHMADI-ADLI, M.; HUVAJ, N.; TOKER, N. K. Rainfall-triggered landslides in an unsaturated soil: a laboratory flume study. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 735, 2017.
- AKSOY, H.; UNAL, N. E.; COKGOR, S.; GEDIKLI, A.; YOON, J.; KOCA, K.; ERIS, E. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume. **Catena**, v. 98, p. 63–72, 2012.
- ALS – AUTOPISTA LITORAL SUL. Relatório Final – Riscos geológico geotécnicos em taludes rodoviários: Desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento e gerenciamento integrado de informações para a BR-376, trecho da Serra do Mar (PR SC) – Fase 3. 2019.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D5298-16**: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. West Conshohocken, 2016.
- BAKER, R.; FRYDMAN, S. Unsaturated soil mechanics: Critical review of physical foundations. **Engineering Geology**, v. 106, p.26-39, 2009.
- BOGENA, H. R.; HERBST, M.; HUISMAN, J. A.; ROSENBAUM, U.; WEUTHEN, A.; VERECKEN, H. Potential of wireless sensor networks for measuring soil water content variability. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 4, p. 1002-1013, 2010.
- CAI, G.; ZHOU, A.; SHENG, D. A permeability function for unsaturated soils with different initial densities. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 51, p.1456-1467, 2014.
- CARVALHO, J. C.; GITIRANA Jr, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. 759 p.
- CELIA, M. A.; BOULOUTAS, E. T.; ZARBA, R. L. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. **Water resources research**, v. 26, n. 7, p. 1483-1496, 1990.

- CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTA DE DESASTRES NATURAIS – CEMADEN. **Ameaças naturais: movimentos de massa**. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/deslizamentos/>>. Acesso em: 18 abril 2019.
- DANIEL, E. D. State-Of-The-Art: Laboratory Hydraulic Conductivity Tests For Saturated Soils. *In: Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil*. ASTM International, 1994.
- DECAGON DEVICES. **Em50 Series Data Collection System: User's Manual**. Washington: Decagon, 2012.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093/94: Solos – Determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1994a.
- ELKAMHHAWY, E.; WANG, H.; ZHOU, B.; YANG, Z. Failure mechanism of a slope with a thin soft band triggered by intensive rainfall. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 340, 2018.
- FARTHING, M. W.; OGDEN, F. L. Numerical solution of Richards' Equation: a review of advances and challenges. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 6, p. 1257-1269, 2017.
- FERREIRA, K. S. M. **Análise hidromecânica de um talude rodoviário composto por solo residual no trecho de Serra do Mar da BR-376/PR**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2017.
- FREDLUND, D. G. The emergence of unsaturated soil mechanics. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 51, n. 12, p. ix-x, 2014.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. John Wiley & Sons, 1993.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated soil mechanics in engineering practice**. John Wiley & Sons, 2012.
- FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, p.521-532, 1994.
- FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, p.533-546, 1994.
- FREDLUND, M. D.; FREDLUND, D. G.; WILSON, G. W. An equation to represent grain-size distribution. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, n. 4, p.817-827, 2000.
- FURMAN, J. **Avaliação da resistência ao cisalhamento de solos tropicais brasileiros não saturados da Serra do Mar – Trecho PR-SP**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 2019.
- GALANTE, A. C.; GARCIA, R. F. Sistema de aquisição de dados de sensores de baixo custo baseado no Arduino. *In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão*, 2014, São Pedro.
- GALEANDRO, A.; DOGLIONI, A.; SIMEONE, V.; SIMUNEK, J. Analysis of infiltration processes into fractured and swelling soils as triggering factors of landslides. **Environmental Earth Sciences**, v. 71, p. 2911-2923, 2014.
- GEOKON. **Instruction Manual: Model 4500**. New Hampshire: Geokon, 2009.
- GERSCOVICH, D. M. S.; GUEDES, M. N. Avaliação das relações de condutividade hidráulica em solos brasileiros não saturados. *In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, 5., 2004, São Carlos. São Carlos: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, v. 1, p. 249-254.

- GITIRANA JR., G. F. N.; FREDLUND, D. G. Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 2, p. 209-212, 2004.
- GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo Método do Perfil Instantâneo, 2013.
- GONZÁLEZ, A. M. A. **Simulação geológico-geotécnica para avaliação de estabilidade de taludes a partir de técnicas de geoprocessamento**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, 2017.
- GRISMER, M. (2012). Standards vary in studies using rainfall simulators to evaluate erosion. **California Agriculture**, v. 66, n. 3, p. 102–107, 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS – IBGE. **Perfil dos Municípios Brasileiros: 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS – IBGE. **População em áreas de risco no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.
- KIM, J.; KIM Y; JEONG, S.; HONG, M. Rainfall-induced landslides by deficit field matric suction in unsaturated soil slopes. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 808, 2017.
- KODIKARA, J.; RAJEEV, P.; CHAN, D.; GALLAGE C. Soil moisture monitoring at the field scale using neutron probe. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 51, p.332-345, 2014.
- LI, A. G.; YUE, Z. Q.; THAM, L. G.; LEE, C. F.; LAW, K. T. Field-monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 42, p.13-26, 2005.
- LI, Q.; ZHU, Q.; ZHENG, J.; LIAO, K.; YANG, G. Soil Moisture Response to Rainfall in Forestland and Vegetable Plot in Taihu Lake Basin, China. **Chinese Geographical Science**, v. 25, n. 4, 2014.
- LORA, M., CAMPORESE, M., & SALANDIN, P. Design and performance of a nozzle-type rainfall simulator for landslide triggering experiments. **Catena**, v. 140, p. 77–89, 2016.
- LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated soil mechanics**. Wiley, 2004.
- MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel filtro. **X Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, v. 2, p. 515-522, 1994.
- MARINHO, F. A. M.; OLIVEIRA, O. M. The Filter Paper Method Revisited. **Geotechnical Testing Journal**, v. 29, n. 3, 2006.
- METER GROUP. **ECH2O EC-5 MANUAL**. Disponível em: <https://www.metergroup.com/environment/products/ec-5-soil-moisture-sensor/>. Acesso em: 06 maio 2019.
- MEURER, I. **Método do Perfil Instantâneo em amostras de solo homogêneas e estratificadas**. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2018.
- MHASKE, S. N., PATHAK, K., & BASAK, A. A comprehensive design of rainfall simulator for the assessment of soil erosion in the laboratory. **Catena**, v. 172, p. 408–420, 2019.
- MORIN, J; GOLDBERG, D; SEGNER, I. A rainfall simulator with a rotating disk. **Transactions of the ASAE**, v. 10, n. 1, p. 74-77, 1967.
- MOTTA, V. F. **Curso de teoria da semelhança**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1972.

- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.
- PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. 14 ed. Piracicaba: Degaspari, 2000.
- PIZARRO, M. L. P. **Simulação de fluxo d'água e transporte de soluto na zona não-saturada do solo pelo método de elementos finitos adaptativo**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- PORTEZAN FILHO, O. **Análise crítica da determinação da condutividade hidráulica do solo utilizando atenuação da radiação gama monoenergética**. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 1997.
- RAHARDJO, H.; LEE, T. T.; LEONG, E. C.; REZAUR, R. B. Response of a residual soil slope to rainfall. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 42, p.340-351, 2005.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manoele, 2004.
- Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1174-1184, 2013
- RIANNA, G.; PAGANO, L.; URCIUOLI, G. Rainfall patterns triggering shallow flowslide in pyroclastic soils. **Engineering Geology**, v. 174, p. 22-35, 2014.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, v. 1, p. 318-333, 1931.
- SATYANAGA, A.; RAHARDJO, H.; LEONG, E. C.; WANG, J. Y. Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution. **Computers and Geotechnics**, v. 48, p. 51-61, 2013.
- SESTREM, L. P. **Concepção e implantação de um plano de instrumentação para avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 2012.
- SHEN, D.; ZHANG, S.; YU, Z. Unanswered questions in unsaturated soil mechanics. **Science China: Technological Sciences**, v. 56, n. 5, p. 1257-1272, 2013.
- SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.
- SILVA, M. A.; SALAH, I. C.; ANDRÉS MIGUEL GONZÁLEZ, A. C. M.; SESTREM, L. P.; FARO V. P.; KORMANN A. C. M.; PASSINI, L. B. Pluviometric Thresholds Application to Predict Slope Failures Along BR-376 Highway, in the State of Paraná – Brazil. *In: Pan-American Conferences on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (PCSMGE)*, 2019, Cancun.
- SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- SISTEMA NACIONAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL – SINPDEC. **Relatório Gerencial – Danos Informados, 2018**. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/relatorios/>>. Acesso em: 06 abril 2019.
- SOILMOISTURE EQUIPMENT. **2725 Series Jet Fill Tensiometers**. California: Soilmoisture, 2005a.
- SOILMOISTURE EQUIPMENT. **Operating Instructions: 2710ARL/2725ARL**. California: Soilmoisture, 2011.
- SOILMOISTURE EQUIPMENT. **Operating Instructions: 5301 Current Transducer**. California: Soilmoisture, 2005b.

- SOILVISION SYSTEM LTD. **SVFLUX: Theory Manual**. Saskatchewan: SoilVision, 2019a.
- SOILVISION SYSTEM LTD. **SVOFFICE 5: Help Manual**. Saskatchewan: SoilVision, 2019b.
- SORBINO, G.; NICOTERA, M. V. Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides. **Engineering Geology**, v. 165, p.105-132, 2013.
- TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; MOSKOWICZ, M.; CAVALCANTI, E. S. C.; LYRA, F. J. M.; NOGUEIRA, A. M. B.; GALLEGOS, H. G. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Editora Universitária da UFPE, 2000.
- TRAN, D. T. Q. **Re-Visitation of Actual Evaporation Theories**. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Alberta, 2013.
- TREVIZOLLI, M. N. B. **Proposta de modelo para avaliação de risco de deslizamentos baseado em cenários de eventos pluviométricos: aplicação em um talude da serra do mar no trecho PR/SP**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 2018.
- TSAI, T. L.; WANG, J. K. Examination of influences of rainfall patterns on shallow landslides due to dissipation of matric suction. **Environmental Earth Sciences**, v. 63, p. 65-75, 2011.
- VICTORINO, M. M. **Influência da chuva nas poropressões e estabilidade dos taludes rodoviários de um trecho da BR 376 na Serra do Mar paranaense**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 2015.
- WOOD, D. M.; CREWE, A.; TAYLOR, C. Shaking table testing of geotechnical models. **International Journal of Physical Modelling in Geotechnics**, v. 2, n. 1, p. 1-13, 2002.
- WU, L. Z.; HUANG, R. Q.; XU, Q.; ZHANG, L. M.; LI, H. H. Analysis of physical testing of rainfall-induced soil slope failures. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, p. 8519-8531, 2015.