

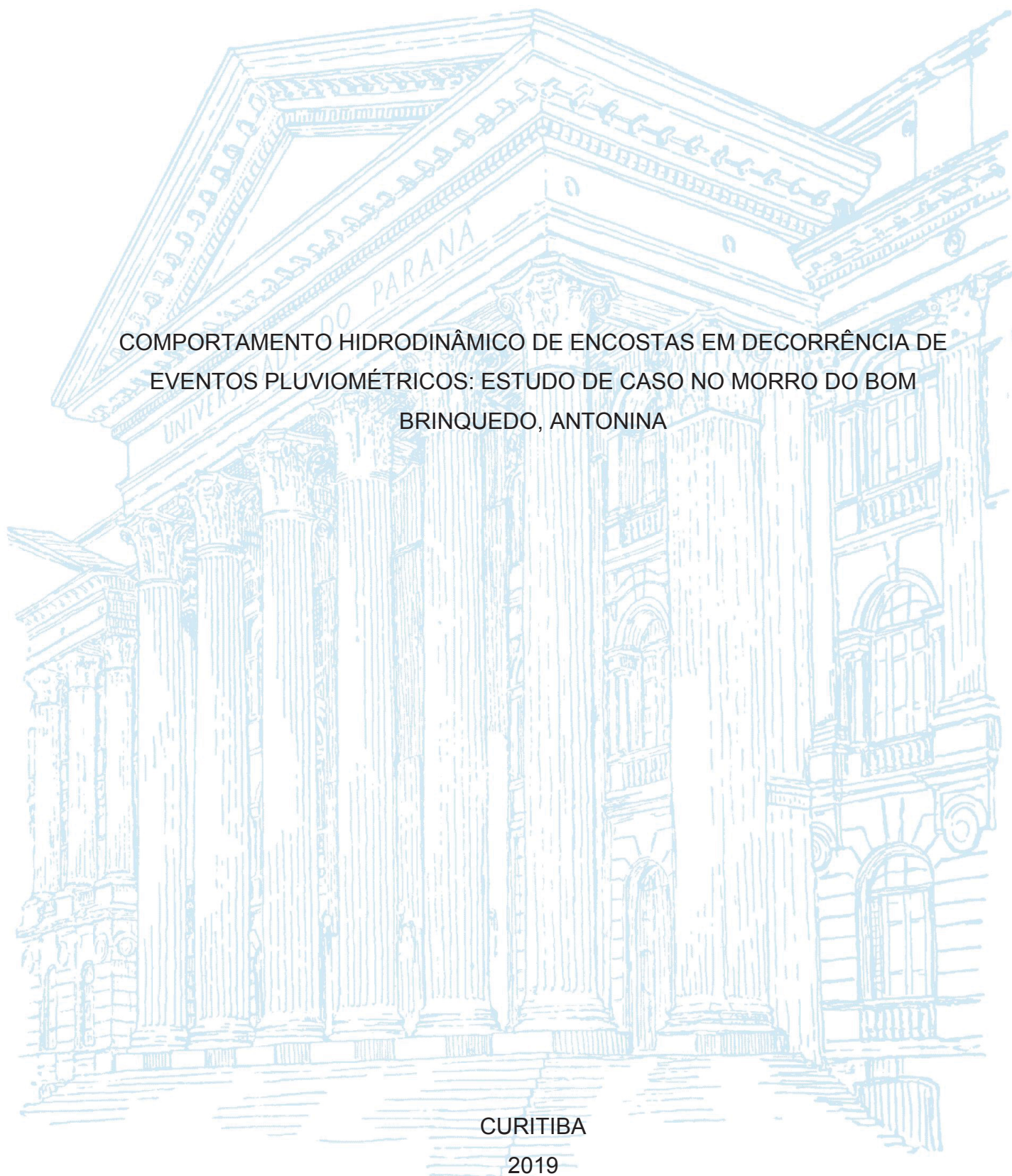
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GISLAINE KLENK

COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE ENCOSTAS EM DECORRÊNCIA DE
EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS: ESTUDO DE CASO NO MORRO DO BOM
BRINQUEDO, ANTONINA

CURITIBA

2019



GISLAINE KLENK

COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE ENCOSTAS EM DECORRÊNCIA DE
EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS: ESTUDO DE CASO NO MORRO DO BOM
BRINQUEDO, ANTONINA

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

Orientador: Prof. Dr. Vitor Pereira Faro

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Russo Neto

CURITIBA

2019

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

K63c

Klenk, Gislaine

Comportamento hidrodinâmico de encostas em decorrência de eventos pluviométricos: estudo de caso no Morro do Bom Brinquedo, Antonina [recurso eletrônico] / Gislaine Klenk. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2019.

Orientador: Vitor Pereira Faro – Coorientador: Luiz Russo Neto.

1. Solos – Absorção e adsorção. 2. Água - Infiltração. 3. Taludes (Mecânica do solo). 4. Solos – Umidade – Paraná. 5. Movimento gravitacional de massa. I. Universidade Federal do Paraná. II. Faro, Vitor Pereira. III. Russo Neto, Luiz. IV .Título.

CDD: 631.432

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



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 GISLAINE KLENK intitulada: **COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE ENCOSTAS EM DECORRÊNCIA DE EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS: ESTUDO DE CASO NO MORRO DO BOM BRINQUEDO, ANTONINA**, sob orientação do Prof. Dr. VITOR PEREIRA FARO, que após terem inquirido a aluna e realizado 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, 21 de Agosto de 2019.


VITOR PEREIRA FARO
Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)


CAROLINE TOMAZONI SANTOS
Avaliador Externo (INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA)


ANDRÉS MIGUEL GONZÁLEZ ACEVEDO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pelo dom da vida, do discernimento e da perseverança.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado me incentivando, obrigada pelas orações, apoio e carinho que sempre demonstraram por mim, em especial à minha mãe Marlene Terezinha Klenk, meu pai Hélio José Klenk, e aos meus irmãos Milene, Érika e Breno.

Ao meu namorado Giovanni Souza Malinoski, por todo o incentivo, ajuda, apoio e carinho durante toda a jornada.

Aos Professores Vitor Pereira Faro e Luiz Russo Neto, pelos conhecimentos repassados e pela confiança depositada em meu trabalho.

Aos Professores Andrés Miguel González Acevedo e Caroline Tomazoni Santos por aceitaram o convite de compor a banca e pela contribuição resultante da avaliação deste trabalho.

Aos amigos obtidos ao longo do período de mestrado, em especial à Maiely Minozzo, Milena Arruda e Eduardo Damin, por serem exemplos de esforço, dedicação e companheirismo.

Aos colegas do projeto (FUNESPAR, CEPED/PR e FA) que prestaram auxílio com o trabalho de campo e laboratório: Maiely Minozzo, Edir Edemir Arioli, Paolla Custodio da Silva e Fabiane Acordes.

Aos colegas de trabalho que me deram apoio nos momentos em que mais precisei, em especial à Camila Kaori Ono Capocci e Alysson Gonçales Quadros.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC), pela estrutura disponibilizada e pela possibilidade fornecida de desenvolver esta pesquisa.

Ao Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), Instituto de Terras, Cartografia e Geologia, (ITCG, antiga Mineropar) e Defesa Civil do Estado do Paraná pelo fornecimento de dados para o desenvolvimento da pesquisa.

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis." (José de Alencar)

RESUMO

Movimentos gravitacionais de massa (MGM's) constituem o processo natural de evolução do relevo montanhoso, em clima úmido, como é o caso das encostas da Serra do Mar paranaense. Esse fenômeno ocorre devido às características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas destes locais, que apresentam predisposição para gerar acidentes naturais. Em março de 2011 ocorreu no litoral paranaense numerosos acidentes geológicos e hidrológicos, inclusive no perímetro urbano de Antonina, onde deslizamentos translacionais foram predominantes e determinantes na instabilidade de encostas do município. Deste modo, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a influência de eventos pluviométricos na distribuição dos valores de sucção e da infiltração de água no solo, e como isso afeta a estabilidade de uma encosta na vertente sul do Morro do Bom Brinquedo, em Antonina, Paraná. Para tanto, foram realizados ensaios geotécnicos, levantamento bibliográfico e análise integrada de vários aspectos, tais como: séries históricas de pluviógrafos e tensiômetros, dados geomorfológicos, de caracterização, resistência, condutividade hidráulica, além da elaboração de curvas de retenção de água no solo (CRAS). Para a análise numérica, utilizou-se do método do equilíbrio limite, com análise antecedente do fluxo transiente. Em relação aos eventos de chuva a serem aplicados, foi interpolado uma curva que melhor se ajustasse à série histórica do local, em termos de intensidade máxima anual, duração do evento pluviométrico e tempo de retorno de 100 anos (curva IDF- intensidade, duração e frequência). Através da análise conjunta dos tensiômetros e da curva de retenção de água no solo conclui-se que cerca de 89,2% dos valores de umidade volumétrica, em todas as profundidades estudadas, ficaram entre 30,0 e 50,0%, e cerca de 28,9% das medidas *in situ* encontravam-se com grau de saturação de 100,0%. Conclui-se também que a ocorrência de chuvas fracas à moderadas no Morro do Bom Brinquedo, porém agindo em um longo período de tempo, possuem uma tendência a infiltração, o que mantém a alta umidade no maciço. Em relação à análise de fluxo, nos dois perfis analisados (L01 e L02) ocorreu maior variação da poro pressão do solo devido à infiltração da chuva nos cenários 3 e 4 de baixa intensidade e longa duração, quando comparados com os eventos 1 e 2 de alta intensidade e curta duração. As chuvas de curta duração e alta intensidade dos cenários 7 e 8, ao serem aplicadas sobre os acumulados de chuva dos cenários 3 e 4, resultaram em um cenário de menor sucção inicial, ocasionando maiores profundidades de infiltração, além da saturação do solo em diversos pontos. Por fim, conforme o resultado da modelagem numérica, conclui-se que a estabilidade do talude está condicionada à ocorrência de grandes acumulados de precipitação, associados à ocorrência de uma chuva muito extrema. O fator de segurança crítico foi encontrado no cenário em que ocorreu um acumulado de precipitação de 230,4 mm em 30 dias associados com um evento concentrado de 174,40 mm/d, ou ainda, um acumulado de 405,21 mm em um mês.

Palavras-chave: Sucção. Movimento gravitacional de massa. Curvas IDF.

ABSTRACT

Gravitational mass movements (GMM'S) constitute the natural evolution process of the mountainous relief, in a humid climate, as is the case of the slopes of the Parana's sea mountain ridge. This phenomenon occurs due to the geological, geomorphological and hydrological characteristics of these sites, which are predisposed to generate natural accidents. In March 2011, numerous geological and hydrological accidents occurred on the Parana coast, including Antonina's urban perimeter, where translational landslides were predominant and determinant in the instability of the city's slopes. Thus, this research aims to evaluate the influence of rainfall events on the distribution of suction values and water infiltration in the soil, and how this affects the stability of a slope on the southern hill of Morro do Bom Brinquedo, in the city of Antonina, Paraná. To this purpose, geotechnical tests, bibliographic survey and integrated analysis of various aspects were performed, such as: historical series of rainfall and tensiometers, geomorphological data, characterization, resistance, hydraulic conductivity, and the elaboration of soil water retention curves (SWRC). For numerical analysis, the limit equilibrium method was used, with antecedent analysis of transient flow. Regarding the rain events to be applied, a curve that best fit the local history series was interpolated, in terms of maximum annual intensity, duration of the rainfall event and return time of 100 years (IDF curve - intensity, duration and frequency). Through the joint analysis of the tensiometers and the soil water retention curve it was concluded that about 89.2% of the volumetric humidity values, in all studied depths, were between 30.0 and 50.0%, and about 28.9% of the in situ measurements were 100% saturated. It is also concluded that the occurrence of light to moderate rainfall at Morro do Bom Brinquedo, but acting over a long period of time, has a tendency to infiltrate, which maintains the high humidity in the soil. Regarding flow analysis, in the two profiles analyzed (L01 and L02) there was greater variation in soil pore pressure due to rainfall infiltration in scenarios 3 and 4 of low intensity and long duration, when compared with events 1 and 2 of high intensity and short duration. The short duration and high intensity rainfall of scenarios 7 and 8, when applied to the accumulated rainfall of scenarios 3 and 4, resulted in a scenario of lower initial suction, causing greater infiltration depths, as well as soil saturation in several points. Finally, according to the numerical modeling results, it is concluded that the slope stability is conditioned to the occurrence of large accumulations of precipitation, associated with the occurrence of extreme rainfall. The critical safety factor was found in the scenario in which a 230.4 mm accumulated precipitation over 30 days associated with a 174.40 mm/d concentrated event, or a 405.21 mm accumulated over one month, occurred.

Keywords: Suction. Gravitational mass movement. IDF curves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – MGM em Antonina, PR - março de 2011	22
Figura 2 – Envoltória de resistência de solos não saturados	29
Figura 3 – Ascensão de água em um tubo capilar: a) esquema do tubo; b) detalhe do menisco.....	34
Figura 4 – Parâmetros da curva de retenção de água no solo.....	38
Figura 5 – Histerese das Curvas de Retenção de água no solo	39
Figura 6 – Exemplo de tensiômetros utilizados na pesquisa.....	47
Figura 7 – Exemplo da evolução do fator de segurança com o tempo.....	53
Figura 8 – Perfil da Frente de umedecimento do solo	58
Figura 9 – Fluxos entre a interface solo-atmosfera e entre as zonas saturada e não saturada	59
Figura 10 – Talude infinito: forças atuantes em uma fatia genérica	63
Figura 11 – Mapa de localização da área de estudo.....	68
Figura 12 – Fotos do local de estudo	70
Figura 13 – Mapa do substrato rochoso, material inconsolidado e de localização das demais áreas de risco no Morro do Bom Brinquedo	73
Figura 14 – Deslizamento de Massa no Morro do Bom Brinquedo	76
Figura 15 – Fluxograma geral da pesquisa	79
Figura 16 – Procedimento de coleta de amostras indeformadas	81
Figura 17 – Mapa de localização dos dados	82
Figura 18 – Determinação do teor de umidade	84
Figura 19 – Determinação da densidade real do solo	84
Figura 20 – Análise Granulométrica, peneiramento fino (a) peneiramento grosso (b) e sedimentação (c).....	85
Figura 21 – Ensaio de determinação do Limite de Plasticidade	85
Figura 22 – Ensaio de determinação do Limite de Liquidez.....	86
Figura 23 – Moldagem dos cilindros metálicos para sucção	88
Figura 24 – Preparação das amostras para o período de equilíbrio da sucção	89
Figura 25 – Disposição dos tensiômetros no terreno	91
Figura 26 – Poços dos pontos de coleta	104
Figura 27 – Curva Granulométrica	107
Figura 28 – Curva de retenção de água no solo – Ponto 01	109

Figura 29 – Curva de retenção de água no solo – Ponto 02	111
Figura 30 – Curva de retenção de água no solo – Ponto 03	112
Figura 31 – Curva de retenção de água no solo – Ponto 04	114
Figura 32 – Curva de retenção de água no solo – Ponto 05	115
Figura 33 – Curva de retenção de água no solo – Solo Residual	117
Figura 34 – Curva de retenção de água no solo – Solo Coluvionar	119
Figura 35 – Valores de Condutividade hidráulica	120
Figura 36 – Comparação da precipitação entre os pluviógrafos do Morro do Bom Brinquedo e de Cachoeira de Cima	121
Figura 37 – Dados acumulados dos pluviógrafos do Morro do Bom Brinquedo e de Cachoeira de Cima	121
Figura 38 – Valores médios e máximos das precipitações mensais das séries históricas de Antonina, entre 1999 e 2017	122
Figura 39 – Máximas precipitações anuais para cada tempo de duração (t)	124
Figura 40 – Precipitação máxima acumulada para cada Tempo de Retorno (T_R)...	125
Figura 41 – Curvas IDF para o município de Antonina, em função do período de retorno.....	126
Figura 42 – Série histórica tensiômetros <i>versus</i> precipitação	127
Figura 43 – Dados tensiômetro <i>versus</i> precipitação no período de 17/10/12 a 08/02/13	129
Figura 44 – Umidade volumétrica em relação à chuva “n-1”	131
Figura 45 – Umidade volumétrica de acordo com a profundidade e tempo	132
Figura 46 – Análise Integrada: Evento 1 – 17/10/2012 à 24/10/2012.....	134
Figura 47 – Análise Integrada: Evento 2 – 31/10/2012 à 10/11/2012.....	137
Figura 48 – Análise Integrada: Evento 3 – 02/12/2012 a 08/12/2012.....	139
Figura 49 – Análise Integrada: Evento 4 – 24/12/2012 a 02/01/2013.....	142
Figura 50 – Perfis geológicos-geotécnicos da área em estudo	144
Figura 51 – Declividade média da área de estudo e localização dos perfis	145
Figura 52 – Cenários 1,2 5 e 6 – Perfil L01	149
Figura 53 – Cenários 3, 4, 7 e 8 – Perfil L01	151
Figura 54 – Cenários 1,2 5 e 6 – Perfil L02.....	153
Figura 55 – Cenários 3, 4, 7 e 8 – Perfil L02.....	155
Figura 56 – Fator de segurança médio em função dos cenários de precipitação 1 a 8	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de resistência de solos naturais brasileiros e não saturados	32
Tabela 2 – Equações empíricas para ajuste da curva de retenção de água no solo	41
Tabela 3 – Relações empíricas para definição da condutividade hidráulica	43
Tabela 4 – Equações de calibração para o papel filtro Whatman N° 42	45
Tabela 5 – Características geomorfológicas do local de estudo	72
Tabela 6 – Dados de caracterização pretéritos	75
Tabela 7 – Localização dos pontos de amostragem	83
Tabela 8 – Parâmetros de resistência, massa específica dos grãos e permeabilidade saturada	92
Tabela 9 – Valores típicos de permeabilidade em solos saturados.....	93
Tabela 10 – Classificação das precipitações (P) acumuladas.....	96
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de caracterização	103
Tabela 12 – Índices físicos correlacionados.....	105
Tabela 13 – Resultados dos Ensaio de Granulometria	106
Tabela 14 – Evento 1 – 17/10/2012 à 24/10/2012.....	133
Tabela 15 – Evento 2 – 31/10/2012 à 10/11/2012.....	136
Tabela 16 – Evento 3 – 02/12/2012 a 08/12/2012.....	138
Tabela 17 – Evento 4 – 24/12/2012 a 02/01/2013.....	141
Tabela 18 – Cenários de chuva para tempo de retorno de 100 anos.....	147

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas;
Ag	– Argila;
AM	– Pontos de Amostragem Mineropar;
Ar	– areia;
ASTM	– Sociedade Americana de Testes e Materiais;
CA	– colúvio de anfibólito;
CDSC	– Ensaio de Cisalhamento Direto com Controle de Sucção;
CEPED/PR	– Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastre do Estado do Paraná;
CG	– colúvio de granito;
cm	– centímetros;
cm ³	– centímetros cúbicos;
COMDEC	– Coordenadoria Municipal de Defesa Civil;
CRAS	– Curva de Retenção de Água no Solo;
DNER-ME	– Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – Método de Ensaio;
Dr.	– doutor;
E	– leste;
EM	– Estágio Múltiplo de Aplicação de Tensão Normal ou Confinante;
Er	– erodibilidade;
EU	– Estágio Único de Aplicação de Tensão Normal ou Confinante;
FA	– Fundação Araucária;
FS	– Fator de Segurança;
FUNESPAR	– Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Faculdade Estadual de Filosofia, Ciências e Letras de Paranaguá e da Universidade Estadual do Paraná;
GMS	– Sensor de Matriz Granular;
ha	– hectare;
IDF	– Intensidade, Duração e Frequência;

ITCG	– Instituto de Terras, Cartografia e Geologia;
kg	– quilos;
kg/m ³	– quilograma por metro cúbico;
km	– quilômetros;
kPa	– quilopascal;
L01	– perfil 01 modelado;
L02	– perfil 02 modelado;
LABFIT	– Programa de Ajuste de Curvas;
LAME	– Laboratórios de Materiais e Estruturas;
LHG	– Laboratório de Hidrogeomorfologia;
m ³	– metros cúbicos;
MGM's	– Movimentos Gravitacionais de Massa;
mm	– milímetros;
mm.h ⁻¹	– milímetros vezes o inverso da hora;
mm/24 h	– milímetros em 24 horas;
mmHg	– miligramas de mercúrio;
mN/m	– miliNewton por metro;
N	– Norte;
NBR	– Norma Brasileira;
Nº	– número;
PR	– Paraná;
Prof.	– professor;
PVC	– Policloreto de Vinila;
RETC	– Programa de Curva de Retenção de água para Solos Não Saturados
SEEP/W	– Modelo numérico de fluxo interno de água;
SG	– saprólito de granito;
Si	– Silte;
SIMEPAR	– Sistema Meteorológico do Paraná;
SL	– solo laterítico;
SLOPE/W	– Modelo numérico de estabilidade de taludes;

SS	– solo saprolítico;
ST	– sondagem a trado;
SB	– subseção;
TCSC	– Ensaio Triaxial de Compressão com Controle de Sucção;
TRIGRS	– Infiltração de Chuva Transitória e Rede-Base Regional;
UFPR	– Universidade Federal do Paraná;
USP	– Universidade de São Paulo;
UTM	– Universal Transversa de Mercator;
VIB	– Velocidade de Infiltração Básica da água no solo.

LISTA DE SÍMBOLOS

%	– porcentagem;
$(u_a - u_w)$	– sucção matricial;
$(\sigma - u_a)$	– tensão total líquida;
$(\sigma - u_w)$	– tensão efetiva;
$(u_a - u_w)_f$	– Sucção matricial na ruptura;
$(\sigma_n - u_a)_f$	– Tensão normal líquida atuante no plano de ruptura;
°C	– graus Celsius;
a, b, c e d	– parâmetros curva IDF;
AA	– seções de solo;
Ad	– índice de adsorção;
AR-01, AR-04	– Área de Risco 01 e 04;
b	– dimensão da fatia;
BB23, BB24, BB25 e BB26	– vertentes 23, 24, 25 e 26 do Morro do Bom Brinquedo;
c	– coesão aparente;
c', Φ'	– Parâmetros efetivos de resistência do solo saturado;
CR-01, CR-04	– vertentes 01 e 04 do Morro da Cruz;
D	– densidade real do solo;
e	– 2,71828;
e	– índice de vazios;
ε	– erro absoluto médio
e_i	– índice de vazios inicial;
g	– aceleração gravitacional;
γ	– peso específico;
γ_d	– peso específico seco;
γ_n	– peso específico natural;
γ_s	– peso específico dos grãos;
γ_{sat}	– peso específico saturado;
γ	– variável reduzida da distribuição Gumbel;

\bar{y}_n	– média da variável reduzida de Gumbel;
h	– Comprimento entre o meio da pedra porosa e o manômetro;
h_c	– altura de ascensão capilar;
I	– intensidade da precipitação;
I_p	– Índice de plasticidade;
k	– condutividade hidráulica;
k_{rel}	– k/k_{sat} ;
k_{sat}	– coeficiente de permeabilidade saturado;
L	– Leitura do manômetro;
L_L	– limite de liquidez;
L_P	– limite de plasticidade;
m.c.a.	– metros de coluna d'água;
n	– porosidade;
N	– tensão normal;
$^\circ$	– graus;
P	– perda de massa por imersão;
P'	– probabilidade de o evento ocorrer;
R_c	– raio do tubo capilar;
R_m	– raio médio;
s	– resistência na base da fatia;
S	– grau de saturação;
S_i	– grau de saturação inicial;
S_{res}	– grau de saturação da zona residual;
S_n	– desvio padrão da variável reduzida de Gumbel;
S_x	– desvio padrão amostral dos valores extremos;
t	– duração;
T_R	– período de retorno;
T_s	– tensão superficial;
u_w	– pressão da água nos poros;
w	– umidade;

W_{papel}	– umidade do papel;
α, m, n, a, b, n'	– parâmetros de ajuste do solo;
δ_{dc}	– massa específica seca de campo;
δ_s	– massa específica de sólidos;
θ	– teor de umidade volumétrica;
θ_r	– teor de umidade volumétrica residual;
θ_s	– teor de umidade volumétrica de saturação;
ρ	– densidade da água;
Φ^b	– Parâmetro de aumento na resistência em função do aumento na sucção;
ψ	– sucção matricial;
ψ_b	– sucção matricial que corresponde à entrada de ar;
ψ_{res}	– sucção que corresponde à umidade volumétrica residual;
\bar{x}	– média dos valores extremos de precipitação;
x_T	– valor extremo com período de retorno T_R ;
x_t	– valor da intensidade de precipitação calculada pela equação de Gumbel;
x_i	– valor da intensidade de precipitação estimada pelo ajuste não-linear das curvas.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 JUSTIFICATIVA	21
1.2 OBJETIVOS	23
1.3 PARCERIAS.....	24
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	24
2 REVISÃO DE LITERATURA	26
2.1 SOLOS NÃO SATURADOS	26
2.1.1 Estado de tensões.....	27
2.1.2 Resistência ao cisalhamento.....	29
2.1.3 Potencial de água no solo	31
2.1.4 Curva de retenção de água no solo	36
2.1.5 Condutividade hidráulica	42
2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA SUCÇÃO	42
2.2.1 Ensaio do papel filtro	44
2.2.2 Tensiômetro	46
2.3 ESTABILIDADE DE TALUDES	49
2.3.1 Fatores predisponentes à ocorrência de movimentos de massa	52
2.3.1.1 Características geológicas-geotécnicas	54
2.3.1.2 Características geomorfológicas.....	55
2.3.1.3 Influência da infiltração de água no solo.....	56
2.3.1.4 Influência da vegetação.....	61
2.3.2 Método de análise de estabilidade por equilíbrio limite	62
2.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS.....	64
3 ÁREA DE ESTUDO	67
3.1 SUBSTRATO ROCHOSO E MATERIAL INCONSOLIDADO.....	72
3.2 EVENTOS DE DESLIZAMENTOS DE MASSA.....	76
4 MATERIAIS E MÉTODOS	78
4.1 LEVANTAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS.....	78
4.1.1 Dados Geotécnicos	80
4.1.1.1 Campanha de coleta de dados.....	80
4.1.1.2 Ensaio de Caracterização	83
4.1.1.3 Ensaio do Papel Filtro.....	86

4.1.1.4 Tensiômetro.....	90
4.1.1.5 Parâmetros de resistência e condutividade hidráulica.....	92
4.1.2 Dados Geomorfológicos.....	93
4.1.3 Dados Pluviométricos.....	94
4.2 ANÁLISE NUMÉRICA.....	99
4.2.1 Análise de fluxo.....	99
4.2.1.1 Definição das condições de contorno.....	100
4.2.2 Análise de estabilidade.....	101
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	103
5.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	103
5.2 ENSAIO DE SUCÇÃO PELO MÉTODO DO PAPEL FILTRO.....	108
5.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	119
5.4 ANÁLISE DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	120
5.4.1 Curva IDF.....	123
5.5 ANÁLISE INTEGRADA.....	127
5.5.1 Análise da série de dados do Tensiômetro frente à variação pluviométrica...	128
5.5.2 Análise da frente de umedecimento.....	130
5.6 MODELAGEM NUMÉRICA.....	143
5.6.1 Definição dos perfis geológicos-geotécnicos.....	143
5.6.2 Definição dos cenários de chuva.....	146
5.6.3 Análise de fluxo.....	148
5.6.4 Análise de estabilidade.....	156
6 CONCLUSÃO.....	160
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	163
REFERÊNCIAS.....	165

1 INTRODUÇÃO

Movimentos de massas constituem o processo natural de evolução do relevo montanhoso, em clima úmido, como é o caso das encostas da Serra do Mar Paranaense. Isto porque as características geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas deste tipo de local apresentam predisposição para gerar acidentes naturais. Em março de 2011 ocorreram no litoral paranaense diversos acidentes geológicos e hidrológicos, provocados por precipitações intensas e concentradas em poucas horas, após um longo período de chuvas continuadas. Na ocasião, dentre os diferentes movimentos de massa ocorreram predominantemente deslizamentos translacionais, caracterizados pela ação superficial da água e consequentes rupturas planas (MINEROPAR, 2013).

No perímetro urbano da cidade de Antonina, as principais encostas atingidas foram as dos Morros do Bom Brinquedo, da Caixa d'Água e da Cruz, nas quais ocorreram dezenas de deslizamentos de terra e detritos, de variadas proporções. Além destas encostas, outras elevações menores foram afetadas, e que totalizaram em grandes prejuízos socioeconômicos para a comunidade local (MINEROPAR, 2013; LOPES, 2013).

Para reduzir ou evitar prejuízos materiais, ambientais e perdas de vidas, deve-se aplicar diversos métodos para estimar a probabilidade de ocorrência de movimentos de massa em um determinado local. Geralmente esses métodos combinam modelos hidrológicos e de estabilidade de taludes, através da modelagem computacional (MINEROPAR, 2013). O método determinístico é baseado no conceito de equilíbrio limite, que leva em consideração aspectos físicos e mecânicos dos solos, para determinação do fator de segurança de um talude. A consideração de valores de sucção no cálculo de estabilidade de taludes ocasiona um acréscimo de resistência, e caso não se garanta esta contribuição, a sua adoção pode ser desfavorável para a segurança. Porém, faz-se necessário uma avaliação confiável da condição de umidade do solo, e sua variação, para mapear e prever com maior acurácia a ocorrência espacial e temporal de deslizamentos translacionais.

Desta forma, esta pesquisa tem por objetivo responder à seguinte problemática: qual é a influência de eventos pluviométricos na distribuição dos valores de sucção e infiltração do solo, e, conseqüentemente, na estabilidade de uma encosta no Morro do Bom Brinquedo em Antonina?

1.1 JUSTIFICATIVA

Quando fenômenos naturais, como inundação, deslizamento, estiagem, etc., ocorrem em locais com ocupação antrópica, estes passam a ser tratados como desastres naturais (MINEROPAR, 2013). Todos os anos o mundo é atingido por desastres naturais, nos quais, a gravidade dos eventos se reflete principalmente em termos humanitários e financeiros (MUNICH RE, 2015; CRED, 2015; CRED, 2017; CRED, 2018). De acordo com CRED (2017), somente no primeiro semestre de 2017, ocorreram cerca de 149 desastres em 73 países, resultando em 3.162 mortes, mais de 80 milhões de pessoas afetadas e prejuízos da ordem de US\$ 32,4 bilhões. Os principais desastres ocorridos foram enchentes e deslizamentos de terra registrados na Ásia, América do Sul e África (CRED, 2017).

Desastres naturais relacionados ao clima foram responsáveis por 88% de todos os eventos ocorridos mundialmente, no período de 1980 a 2014 (MUNICH RE, 2015). Já entre os anos 1994 e 2013, do total de desastres ocorridos em todo o mundo, cerca de 11% foram devidos a deslizamentos de terra, sendo o maior índice devido à tempestades (53%) (CRED, 2015). Isto ocorre, principalmente, devido ao crescente avanço da mancha urbana em terrenos de declividade acentuada e áreas escarpadas, combinados com o efeito de tempestades tropicais com chuvas intensas (MUNICH RE, 2015; CRED, 2018).

Movimentos gravitacionais de massa (MGM's) são comuns e recorrentes nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, principalmente nas encostas da Serra do Mar e elevações adjacentes (ZUQUETTE e PEJON, 2004). De acordo com a Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil (2018), em 2017 foram registrados 587 desastres, de diversas tipificações, no estado do Paraná. Ainda segundo o órgão, cerca de 82% dos desastres registrados estão diretamente relacionados à incidência de chuvas, destacando-se os vendavais (48,8%), as enxurradas (24,4%), os alagamentos (13,9%), os granizos (6,7%) e os deslizamentos (6,3%). Entre os anos de 2011 e 2017 foram registrados 148 deslizamentos no estado, sendo 17 eventos ocorridos somente no ano de 2011 (COORDENADORIA ESTADUAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL, 2018).

Os MGM's e fluxos de detritos, ocorridos em março de 2011 na região da Serra do Mar Paranaense, foram desencadeados devido a precipitações intensas em um curto período de tempo, precedidas de um período de chuvas acumuladas, o que

provocou danos em estradas, na infraestrutura urbana e rural, além de perda de vidas humanas (INPE, 2011; LOPES, 2013). No município de Antonina, mais de quatrocentas pessoas foram evacuadas dos bairros de Laranjeiras, Graciosa de Baixo e Caixa d'Água. (MINEROPAR, 2013). Na Figura 1 está retratado a magnitude de um MGM ocorrido no município de Antonina, em 2011.

Figura 1 – MGM em Antonina, PR - março de 2011



Fonte: Lopes (2013)

De acordo com o levantamento realizado pela MINEROPAR (2013) nas vertentes de Antonina, os solos dos morros desta região são predominantemente erodíveis. Ainda de acordo com o órgão, o aumento da umidade acarreta perda de resistência mecânica muito rapidamente, principalmente a resistência ao cisalhamento. Esta relação apresentada pelos solos do local reflete uma das principais justificativas para a alta frequência de movimentos de massa nas elevações inclinadas da região (MINEROPAR, 2013; LOPES, 2013).

Portanto, estudos relacionados à deslizamentos (em particular, movimentos de massa translacionais) na área urbana de Antonina tem fundamental importância para evitar futuros danos sociais, econômicos e ambientais que possam vir a ocorrer.

Os danos sociais vão desde perda de vidas, até a interrupção de atividades comunitárias, como transporte, prestação de serviços públicos, eventos sociais, religiosos, entre outros.

O risco econômico, refere-se principalmente ao custo de possíveis perdas ambientais e sociais, por efeito de um desastre natural, além de gastos com a interdição do transporte viário, recuperação de estruturas, entre outros. O risco ambiental incorre devido à destruição temporária ou definitiva de parte de uma paisagem, principalmente quando altera o meio de tal forma que a sua recuperação espontânea se torna impossível ou inviável (MINEROPAR, 2013).

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a influência de eventos pluviométricos na distribuição dos valores de sucção e da infiltração de água no solo, e como isso afeta a estabilidade de uma encosta na vertente sul do Morro do Bom Brinquedo, em Antonina, Paraná.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Caracterizar as propriedades geotécnicas e hidráulicas do solo por meio de ensaios de laboratório e instrumentação de campo;
- b) Caracterizar a ocorrência de eventos de chuva por meio da confecção das curvas de intensidade, duração e frequência (curva IDF), que relacionam a intensidade pluviométrica máxima com o tempo de ocorrência do evento e o período de retorno, de acordo com a série histórica registrada pelo pluviógrafo;
- c) Realizar a análise conjunta da série de dados do tensiômetro com a precipitação ocorrida, para determinar a variação dos valores de sucção no solo não saturado;
- d) Analisar a variação da frente de umedecimento com o tempo, para determinar as mudanças na saturação do solo de acordo com a intensidade pluviométrica;
- e) Determinar fatores de segurança em diferentes cenários de chuva e sua influência na condição de estabilidade por meio de modelagem numérica.

1.3 PARCERIAS

A obtenção de alguns dados deu-se graças à participação da autora como bolsista voluntária no projeto intitulado “Determinação dos Índices Pluviométricos Críticos para a Ocorrência de Movimentos Gravitacionais de Massa na Região Sul Sudoeste do Paraná”, pela Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Faculdade Estadual de Filosofia, Ciências e Letras de Paranaguá e da Universidade Estadual do Paraná (FUNESPAR), em parceria com o Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastre do Estado do Paraná (CEPED/PR), e a Fundação Araucária (FA). O fornecimento de dados do meio físico deu-se por parte do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), Instituto de Terras, Cartografia e Geologia, (ITCG, antiga Mineropar) e Defesa Civil do Estado do Paraná.

Para a realização dos ensaios e análise das amostras, foram utilizados os equipamentos e meios físicos dos Laboratórios de Materiais e Estruturas (LAME), no Campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos.

O primeiro capítulo refere-se à uma breve introdução ao tema, para fazer-se entender a problemática da pesquisa, além de conter os objetivos e justificativas sociais, econômicas e ambientais da pesquisa.

O capítulo 2 foi dedicado à revisão bibliográfica, na qual aborda-se sobre propriedades fundamentais de solos não saturados, tais como estado de tensões, potencial da água no solo e curva de retenção de água no solo. Além disso, discute-se sobre os métodos de medição da água no solo que foram utilizados no desenvolvimento da pesquisa. Algumas características de estabilidade de taludes, como fatores predisponentes à movimentos de massa, são abordados, bem como os fatores de infiltração da água da chuva e métodos de análise de estabilidade por equilíbrio limite. Por fim, neste capítulo é abordado o método da curva IDF (intensidade, duração e frequência) que foi utilizado na interpretação das características da precipitação, de acordo com a série histórica registrada pelo pluviógrafo.

No terceiro capítulo apresenta-se a caracterização da área de estudo, abordando aspectos como localização, substrato rochoso, material inconsolidado, aspectos climáticos, vegetação, relevo, histórico de eventos de deslizamento de massa, entre outros.

O capítulo 4 contém a estratégia usada nesta pesquisa, com os métodos e materiais adotados para a realização dos ensaios de campo e laboratório, além das técnicas para tratamento dos dados colhidos e as características da modelagem numérica proposta.

No capítulo 5 estão apresentados os resultados obtidos, com suas devidas discussões sobre os dados gerados e colhidos, as suas análises, seleção e interpretação, bem como a solução numérica resultante da modelagem dos cenários selecionados. Já no capítulo 6 estão contidas as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho. Na sequência, estão apresentadas as referências utilizadas no desenvolvimento da pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo é destinado para a apresentação do referencial teórico sobre conceitos de solos não saturados, sucção, curva de retenção de água no solo, ensaios de medição da água no solo, estabilidade de taludes, movimentos gravitacionais de massa, caracterização da precipitação, entre outros, com fins de proporcionar o entendimento de conceitos fundamentais. Além disso, apresenta-se o estado atual da arte dos temas em questão, através da contribuição de diversos autores.

2.1 SOLOS NÃO SATURADOS

Os princípios da Mecânica dos Solos foram desenvolvidos para a condição de solo saturado, como efeito de simplificação e também por representar, na maioria dos casos, a situação mais crítica. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993) a formulação para mecânica de solos saturados pode ser aplicada quando o grau de saturação é superior a 85%. Nesta condição, o solo pode ser representado por um sistema bifásico, composto pelas fases líquida e sólida (BURGOS e CONCIANI, 2015).

Apesar de muitas análises serem simplificadas para situações saturadas, a condição de solo não saturado está presente em diversas obras geotécnicas. O solo não saturado consiste num sistema trifásico, composto pelas fases sólida (partículas de minerais), líquida (água) e gasosa (ar), em quantidades distintas (LAMBE e WHITMAN, 1969). Fredlund e Morgenstern (1977), propõem que se deve considerar uma quarta fase independente no sistema de solos não saturados, denominada interface ar-água. Esta interface, também chamada de película contrátil, é uma superfície fronteira que exerce tensões de tração nos materiais contíguos (tensão superficial), comportando-se como uma membrana elástica (BURGOS e CONCIANI, 2015).

De maneira geral, os solos encontram-se não saturados acima do nível do lençol freático, e possuem poro pressão negativa. Variações sazonais como de temperatura, umidade e pluviometria podem alterar sensivelmente o grau de saturação do solo, principalmente em superfícies inclinadas, como as encostas naturais (FREDLUND e RAHARDJO, 1993; MACHADO e VILAR, 2015).

Os solos tropicais normalmente apresentam-se profundamente intemperizados, principalmente os lateríticos, com sua fração argila constituída pelo argilomineral caulinita e por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio recobrando o argilomineral. Esta composição resulta em agregações que possuem microporos e macroporos, os quais interferem nas propriedades índices e no comportamento geotécnico destes solos (GITIRANA JR. *et al.*, 2012 *apud*. BURGOS e CONCIANI, 2015). A água presente no solo na forma líquida apresenta uma série de propriedades fundamentais que determinam o seu comportamento no sistema. Características como polaridade, pontes de hidrogênio e tensão superficial da água fazem com que esta, em sistemas porosos, atinja estado de menor energia livre e apresente-se retida contra a gravidade, por efeito de capilaridade e também por adsorção. A textura e a estrutura do solo são os principais responsáveis pela capacidade de armazenamento e disponibilidade da água nos solos, além de permitir a passagem de água para camadas profundas do perfil do solo e da crosta terrestre (REINERT e REICHERT, 2006).

De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), o solo não saturado pode ser analisado como um sistema bifásico, desde que se considere um fluido compressível preenchendo os poros. Em relação ao comportamento, um solo não saturado pode ser concebido como uma mistura de duas fases em equilíbrio (partículas de solo e película contráctil) e duas fases que fluem (ar e água), ao se aplicar um gradiente de tensão (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). Quando se tratar de correlações entre massa e volume, considera-se somente três fases, nas quais o volume da interface ar-água é considerado como parte da massa de água. Por fim, se a análise de tensão for de um sistema multifásico contínuo, a interface ar-água deve ser considerada como uma fase independente (FREDLUND e RAHARDJO, 1993; BURGOS e CONCIANI, 2015).

2.1.1 Estado de tensões

Para o caso de materiais não saturados, segundo Gitirana Jr. *et al.* (2015), o estado de tensões continua sendo tema de pesquisa e discussão no meio técnico científico. A forma de representação do estado de tensões em materiais não saturados, iniciou sua primeira corrente de pensamento com Terzaghi, que se baseou na busca de uma variável única de tensões. A segunda linha de raciocínio, começou

a partir do estudo de Fredlund e Morgenstern (1977), a qual considera inadequada representar o estado de tensões no solo em função de uma única variável. De acordo com os autores, têm-se duas variáveis para descrever o estado de tensões no solo, definidas em planos ortogonais, que são a tensão total líquida ($\sigma - u_a$) e a sucção matricial ($u_a - u_w$). Esse par de variáveis permite avaliar o comportamento mecânico sob variações de tensões, e é o mais simples de ser usado tendo em vista que uma variação na pressão na água dos poros (u_w) afeta somente a parcela da sucção matricial (SOTO, 2004; GITIRANA Jr. *et al.*, 2015; CAMPOS e MOTTA, 2015).

No cisalhamento os valores de poro pressões não influenciam, já que atuam em termos de tensões volumétricas, ou seja, confinantes. Para solos não saturados, realiza-se a análise a partir do estado de tensões genérico, similarmente ao que é feito para materiais saturados. Deste modo, é possível quantificar o nível médio de confinamento, de cisalhamento e o desvio do estado de tensões em relação ao estado ortotrópico (SOTO, 2004; GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

Aplicando-se a condição de contorno na qual a sucção matricial tende a zero, nota-se que a tensão efetiva ($\sigma - u_w$) é um caso particular das duas variáveis de tensão independentes. Portanto, tanto as duas variáveis de tensão do solo não saturado, quanto a tensão efetiva devem obedecer a condições limites, nas quais as relações ($u_a - u_w$), ($\sigma - u_a$) e ($\sigma - u_w$) têm que ser maiores ou iguais à zero (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015). De acordo com Gitirana Jr. *et al.* (2015):

Situações que violem tais condições são fisicamente improváveis ou até mesmo impossíveis. Não é possível se ter poro pressões de água maiores do que poro pressão de ar. Em tal situação, a água ocupa parte dos volumes preenchidos pelo ar e ambas as pressões são equalizadas. Similarmente, não é possível uma situação na qual a poro pressão de ar supere significativamente a tensão total do solo, caso contrário, resistências coesivas poderiam ser eventualmente vencidas, causando a desagregação do esqueleto sólido [...] (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015, p. 210).

Portanto, a capacidade de retenção de água nos poros do solo depende do seu estado de tensões. Para o caso de solos não saturados, a corrente de estudos de Fredlund e Morgenstern (1977) é a que vem sendo usada e aperfeiçoada. Nos itens a seguir, é abordado com mais detalhes a variável de tensão ($u_a - u_w$), que equivale à sucção matricial do solo.

2.1.2 Resistência ao cisalhamento

De acordo com o conceito de variáveis de tensão, abordado no item 2.1.1, a equação de resistência ao cisalhamento para solos não saturados pode ser escrita através da equação (1) (FREDLUND *et al.*, 1978):

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (1)$$

Onde:

c', ϕ' = Parâmetros efetivos de resistência do solo saturado;

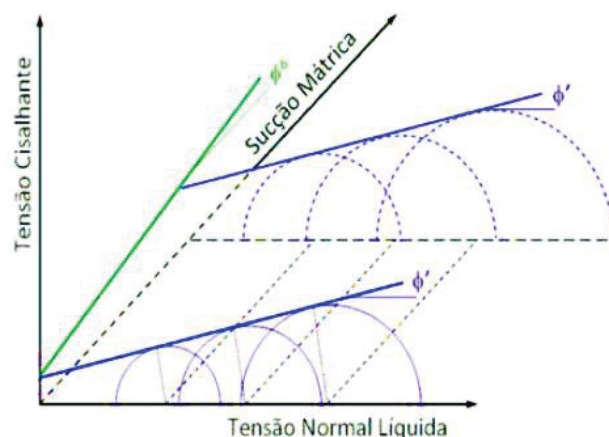
$(\sigma_n - u_a)_f$ = Tensão normal líquida atuante no plano de ruptura, na ruptura;

$(u_a - u_w)_f$ = Sucção matricial na ruptura;

ϕ^b = Parâmetro que representa o aumento na resistência em função do aumento na sucção.

Em solos não saturados, a envoltória de ruptura é tridimensional, denominada Envoltória de Ruptura Estendida de Mohr-Coulomb (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). O gráfico relaciona no eixo ordenado a tensão cisalhante, e nas abcissas as duas variáveis do estado de tensões (sucção matricial e tensão líquida). A envoltória de resistência consiste em um plano com inclinações ϕ^b e ϕ' conforme a Figura 2.

Figura 2 – Envoltória de resistência de solos não saturados



Fonte: Fredlund *et al.* (1978) *apud.* Campos e Motta (2015)

A envoltória planar de resistência ao cisalhamento em solos não saturados pode ser representada pela equação (2) (CAMPOS e MOTTA, 2015):

$$\tau_f = c + (\sigma_n - u_a)_f \tan \phi' \quad (2)$$

$$c = c' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (3)$$

A coesão c pode ser entendida como uma resistência à tração do solo não saturado. Se o solo estiver na condição saturada, o parâmetro c (coesão aparente) é igual ao parâmetro c' . De acordo com a equação (3), sendo ϕ^b constante, a coesão aparente aumenta linearmente com o aumento da sucção. Já o parâmetro c' (coesão efetiva), representa a resistência à tração do solo saturado, apesar de que, muitas vezes, pode não ter nenhum significado físico devido à linearização de resultados de ensaios de solos com envoltórias não lineares, resultando em um parâmetro que acaba definindo somente a reta no espaço de tensões de Mohr-Coulomb (FREDLUND e RAHARDJO, 1993; CAMPOS e MOTTA, 2015). A importância desses parâmetros é ressaltada por Campos e Motta (2015):

[...] mesmo em presença de valores baixos de coesão efetiva e/ou de sucção, é possível ter-se valores de coesão aparente grandes o suficiente para, por exemplo, manter estável uma encosta não saturada sob a ação de infiltração de águas de chuvas (CAMPOS e MOTTA, 2015, p. 470).

Porém, deve-se observar que a envoltória de resistência de solos não saturados pode ser linear ou curva (FREDLUND, 2006). Os solos tropicais, por exemplo, possivelmente apresentam uma superfície de resistência curva (CAMPOS e MOTTA, 2015). Entretanto, isto não impede que os conceitos básicos de resistência ao cisalhamento de solos não saturados sejam aplicados na prática geotécnica. De acordo com Campos e Motta (2015), no caso de problemas de estabilidade de taludes, pode-se trabalhar com envoltórias de resistência multilíneas nos eixos correspondentes às variáveis de tensão líquida e matricial. Para tanto, segundo os autores, seria necessário utilizar programas de análise convencionais de estabilidade (equilíbrio limite), e dentro deles inserir limites de validade de variações lineares dos parâmetros ϕ' e ϕ^b em relação aos valores das duas variáveis de tensão.

Diversos autores realizaram estudos para determinar os parâmetros de resistência de diferentes solos brasileiros, conforme mostra a Tabela 1. Esses parâmetros foram obtidos de acordo com envoltórias lineares, para as faixas de variação de sucção indicadas e para baixos valores de tensões líquidas, e que podem ser usados como referência para estudos de instabilidade de encostas em solos não saturados (CAMPOS e MOTTA, 2015). Campos e Motta (2015) ressaltam que, de acordo com a análise dos diversos dados da Tabela 1, a grande faixa de variação do parâmetro ϕ^b independe das características de distribuição granulométrica e da plasticidade dos solos tropicais considerados.

2.1.3 Potencial de água no solo

O movimento de massas na natureza acontece desde pontos de energia livre mais altos para pontos de energia mais baixa, e é caracterizado pela energia potencial, pois a energia cinética é desconsiderada devida a baixa velocidade da água desenvolvida no solo (REINERT e REICHERT, 2006; MACHADO e VILAR, 2015). O potencial da água em um solo não saturado é composto por diferentes partes, tais como: potencial gravitacional, pneumático, osmótico, matricial, térmico e o de consolidação. Nesta pesquisa foram comentados somente os potenciais gravitacional, osmótico e matricial, devido ao fato de o restante ter menor importância no comportamento geotécnico dos solos não saturados. (SOTO, 2004; REINERT e REICHERT, 2006).

O total de energia por unidade de massa é definido como sendo o potencial total, e pode ser expresso em termos de pressão, como por exemplo, em joules/kg. O potencial gravitacional equivale à energia de posição dentro do campo gravitacional, importante na definição do movimento de água e deve ser computado para equacionamento do fluxo de água no solo. O potencial osmótico ocorre devido à diferença de composição entre a água do solo (que tem presença de sais minerais em dissolução) com a água pura, na qual a sucção osmótica é exercida para levar a água do solo do estado original ao estado padrão. Considera-se a sucção osmótica como sendo equivalente à sucção total quando o solo se encontra saturado, pois a componente matricial não ocorre, e fica apenas o efeito da concentração de solutos (SOTO, 2004; REINERT e REICHERT, 2006; MACHADO e VILAR, 2015).

Tabela 1 – Parâmetros de resistência de solos naturais brasileiros e não saturados

Material	e_i	S_i (%)	c' (kPa)	ϕ' (graus)	ϕ^b (graus)	Tipo de Ensaio	$\sigma - u_a$ (kPa)	$u_a - u_w$ (kPa)	Fonte																																																																											
Residual de migmatito arenoso (IP=14%)	-	-	0	40	11.5	TCSC-EM	10	10 a 60	Abramento e Carvalho (1989)																																																																											
Colúvio arenoso	-	-	0	38	14.4					Residual de gnaisse kinzigítico–Areia siltosa (NP)	0.91	28	29.8	28.8	28.0	CDSC-EM	68	50 a 200	Fonseca (1991)	Residual de gnaisse kinzigítico–Areia siltosa (IP=10%)	0.76	66	12.4	30.6	29.3	Colúvio amarelo, areno-argiloso (IP=23%)	1.18	56	0	26.4	6.7	CDSC-EU	56	25 a 220	Carrilo (1993)	Colúvio vermelho, arenoso-argiloso (IP=17%)	1.05	70	11.1	26.8	5.5	Residual de biotita gnaisse, areia argilo-siltosa (IP=18%)	0.98	52	8.6	30.4	6.8	CDSC-EU	58	25 a 220	Carrilo (1993)	Residual de biotita gnaisse, areia silto-argilosa (NP)	1.13	58	13.7	28.7	4.6	Residual de granulito, argila silto-arenosa (IP=35%)	1.55	56	33.3	28.4	10.3	CDSC-EM	60	40 a 140	Fonseca <i>et al.</i> (1994); Campos (1997)	Residual de granulito, areia silto-argilosa (IP=24%)	1.88	52	21.8	31.9	6.9	Residual de granulito, areia argilo-siltosa (IP=12%)	1.16	61	21.8	31.9	7.3	TCSC-EM	50	Rohm e Vilar (1995)	Solo laterítico, arenoso (IP=14%)	1.0
Residual de gnaisse kinzigítico–Areia siltosa (NP)	0.91	28	29.8	28.8	28.0	CDSC-EM	68	50 a 200	Fonseca (1991)																																																																											
Residual de gnaisse kinzigítico–Areia siltosa (IP=10%)	0.76	66	12.4	30.6	29.3					Colúvio amarelo, areno-argiloso (IP=23%)	1.18	56	0	26.4	6.7	CDSC-EU	56	25 a 220	Carrilo (1993)	Colúvio vermelho, arenoso-argiloso (IP=17%)	1.05	70	11.1	26.8	5.5	Residual de biotita gnaisse, areia argilo-siltosa (IP=18%)	0.98	52	8.6	30.4	6.8	CDSC-EU	58	25 a 220	Carrilo (1993)	Residual de biotita gnaisse, areia silto-argilosa (NP)	1.13	58	13.7	28.7	4.6	Residual de granulito, argila silto-arenosa (IP=35%)	1.55	56	33.3	28.4	10.3	CDSC-EM	60	40 a 140	Fonseca <i>et al.</i> (1994); Campos (1997)	Residual de granulito, areia silto-argilosa (IP=24%)	1.88	52	21.8	31.9	6.9	Residual de granulito, areia argilo-siltosa (IP=12%)	1.16	61	21.8	31.9	7.3	TCSC-EM	50	Rohm e Vilar (1995)	Solo laterítico, arenoso (IP=14%)	1.0	50	25.3	27.9	18.4												
Colúvio amarelo, areno-argiloso (IP=23%)	1.18	56	0	26.4	6.7	CDSC-EU	56	25 a 220	Carrilo (1993)																																																																											
Colúvio vermelho, arenoso-argiloso (IP=17%)	1.05	70	11.1	26.8	5.5					Residual de biotita gnaisse, areia argilo-siltosa (IP=18%)	0.98	52	8.6	30.4	6.8	CDSC-EU	58	25 a 220	Carrilo (1993)	Residual de biotita gnaisse, areia silto-argilosa (NP)	1.13	58	13.7	28.7	4.6	Residual de granulito, argila silto-arenosa (IP=35%)	1.55	56	33.3	28.4	10.3	CDSC-EM	60	40 a 140	Fonseca <i>et al.</i> (1994); Campos (1997)	Residual de granulito, areia silto-argilosa (IP=24%)	1.88	52	21.8	31.9	6.9	Residual de granulito, areia argilo-siltosa (IP=12%)	1.16	61	21.8	31.9	7.3	TCSC-EM	50	Rohm e Vilar (1995)	Solo laterítico, arenoso (IP=14%)	1.0	50	25.3	27.9	18.4																												
Residual de biotita gnaisse, areia argilo-siltosa (IP=18%)	0.98	52	8.6	30.4	6.8	CDSC-EU	58	25 a 220	Carrilo (1993)																																																																											
Residual de biotita gnaisse, areia silto-argilosa (NP)	1.13	58	13.7	28.7	4.6					Residual de granulito, argila silto-arenosa (IP=35%)	1.55	56	33.3	28.4	10.3	CDSC-EM	60	40 a 140	Fonseca <i>et al.</i> (1994); Campos (1997)	Residual de granulito, areia silto-argilosa (IP=24%)	1.88	52	21.8	31.9	6.9	Residual de granulito, areia argilo-siltosa (IP=12%)	1.16	61	21.8	31.9	7.3	TCSC-EM	50	Rohm e Vilar (1995)	Solo laterítico, arenoso (IP=14%)	1.0	50	25.3	27.9	18.4																																												
Residual de granulito, argila silto-arenosa (IP=35%)	1.55	56	33.3	28.4	10.3	CDSC-EM	60	40 a 140	Fonseca <i>et al.</i> (1994); Campos (1997)																																																																											
Residual de granulito, areia silto-argilosa (IP=24%)	1.88	52	21.8	31.9	6.9					Residual de granulito, areia argilo-siltosa (IP=12%)	1.16	61	21.8	31.9	7.3	TCSC-EM	50	Rohm e Vilar (1995)	Solo laterítico, arenoso (IP=14%)	1.0	50	25.3	27.9	18.4																																																												
Residual de granulito, areia argilo-siltosa (IP=12%)	1.16	61	21.8	31.9	7.3	TCSC-EM	50	Rohm e Vilar (1995)																																																																												
Solo laterítico, arenoso (IP=14%)	1.0	50	25.3	27.9	18.4																																																																															

e_i , S_i = índice de vazios e grau de saturação médios dos corpos de prova antes dos ensaios;
CDSC= ensaio de cisalhamento direto com controle de sucção;
TCSC= ensaio triaxial de compressão com o controle de sucção;
EU= estágio único de aplicação de tensão normal ou confinante;
EM= estágio múltiplo de aplicação de tensão normal ou confinantes,

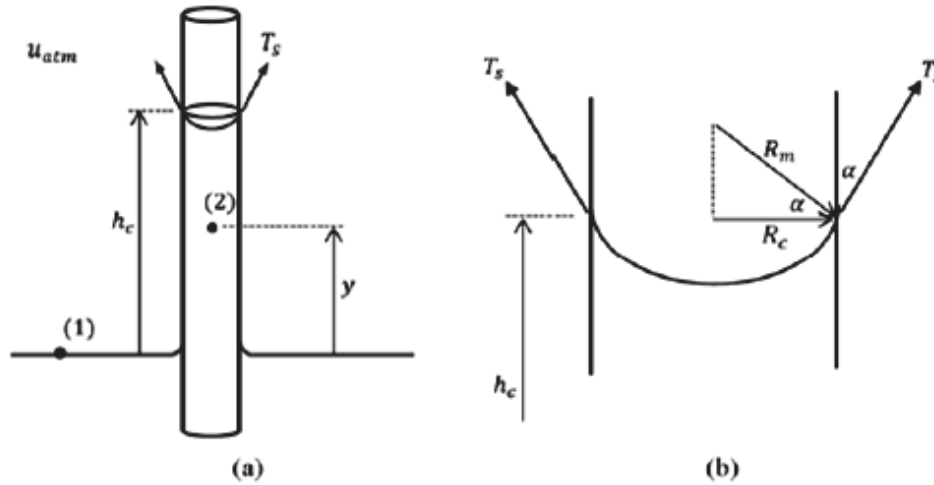
Fonte: adaptado de Campos e Motta (2015)

O potencial matricial da água do solo decorre do efeito combinado da ação das forças capilares e de adsorção, que surgem da interação entre a água e a matriz do solo (HILLEL, 1971 *apud*. SOTO, 2004). Ao associar o sistema poroso do solo como um sistema capilar e com determinada área superficial, infere-se que a água fica retida no solo devido aos mecanismos de capilaridade e adsorção. Estas são quantificadas em forma global devido à dificuldade de discriminá-las. Nestes dois processos, a maior quantidade de água fica mais disponível por efeito capilar, enquanto o menor volume e mais fortemente retido no solo, fica associado ao efeito de adsorção. A sucção matricial é responsável pela retenção de água contra a ação da gravidade, sendo apresentada com sinal negativo (SOTO, 2004; REINERT e REICHERT, 2006; GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

A capilaridade é produto da tensão superficial na interface ar-água, na qual a superfície do líquido se contrai e fica tracionada, refletindo a diferença de pressão existente entre o ar e a água, chamada de sucção matricial. Esta interface é gerada pelos efeitos capilares no menisco que se forma entre as partículas de solo adjacentes. Através do equilíbrio de forças, a força exercida pelo ar é igual às contrárias exercidas pela água, e quando a pressão do ar corresponde à atmosférica, a pressão existente nas moléculas de água é proporcional à tensão superficial e ao raio capilar. A tensão superficial é originada pela interação das forças intermoleculares produzidas nas zonas de contato entre as partículas do solo, água e ar, sendo esta responsável pela concavidade da interface ar-água e da ascensão da coluna de água no capilar (SOTO, 2004, MACHADO e VILAR, 2015, GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

Para melhor compreensão, faz-se a analogia da água no capilar do solo com o processo de ascensão de água em um tubo capilar (Figura 3). Nesta figura, o ângulo de contato α refere-se à interação entre a água e o material do tubo, e define a direção da força no contato sólido-líquido-gás. A ascensão capilar acontece somente em materiais com ângulos de contato menores do que 90° , sendo a força produzida direcionada de forma ascendente. A tensão superficial (T_s) assume um valor característico do fluido em questão, que no caso da água pura a 20°C , é igual a $72,75\text{ mN/m}$ (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015; MACHADO e VILAR, 2015). Através do equilíbrio de forças verticais da Figura 3(a), é determinado a altura de ascensão capilar (h_c), através da equação (4):

Figura 3 – Ascensão de água em um tubo capilar: a) esquema do tubo; b) detalhe do menisco



Fonte: Gitirana Jr. *et al.* (2015)

$$h_c = \frac{2 T_s \cos \alpha}{R_c \gamma_w} \quad (4)$$

Onde: R_c é o raio do tubo capilar.

Determina-se que o raio do capilar tem relação com o raio do menisco pela fórmula $R_c = R_m \cos \alpha$, além de considerar a coluna de água erguida por capilaridade como estática e a carga hidráulica constante ao longo do sistema. Por conseguinte, a sucção matricial no topo da coluna é expressa como sendo a diferença entre o valor de poro pressão de ar e de água, como mostra a equação (5) (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015):

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_m} \quad (5)$$

Para uma condição tridimensional, a equação de capilaridade pode ser generalizada pela Equação de Laplace, na qual o menisco possui dois raios de curvatura em direções ortogonais. A equação do capilar cilíndrico representa um caso particular da Equação de Laplace, na qual o menisco tem a forma de uma calota de esfera, de raios iguais. Apesar dos capilares do solo não apresentarem geometria perfeitamente cilíndrica, a aproximação da análise através do tubo capilar cilíndrico é

um facilitador quanto ao entendimento da capacidade de retenção de água em materiais porosos (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015; MACHADO e VILAR, 2015).

Carvalho *et al.* (2015) destacam que do ponto de vista químico-mineralógico, a natureza do mineral e as características do fluido exercem influência na capilaridade do solo. A análise do comportamento da água no capilar cilíndrico possibilita a interpretação de que quanto menor o poro, maior será a sucção necessária para drenar a água desse poro, com a sucção matricial determinada a partir do raio do menisco. Além disso, o raio do menisco pode ser diferente do raio do poro quando o ângulo de contato for maior do que zero e quando a sucção máxima possível não tenha sido atingida (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

Por outro lado, as forças de adsorção do mineral dependem, predominantemente, da mineralogia do solo e da química do fluido. O principal fator que influencia o fenômeno da adsorção no solo é a sua polaridade e/ou constante dielétrica, apesar da porosidade do material também colaborar (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015; MACHADO e VILAR, 2015).

De acordo com Carvalho *et al.* (2015), a capilaridade intervém na resistência dos solos não saturados através da tensão normal entre os grãos, modificando a força de atrito, e numa escala menor contribui para o surgimento de certa coesão. Já em relação à sucção, os autores comentam:

[...] como o fenômeno depende, em maior escala, da energia de adsorção dos minerais, dependendo das proporções entre a energia capilar e a energia de adsorção, sua contribuição será predominantemente para a coesão, embora a junção da zona de hidratação de dois minerais vizinhos termine gerando certo efeito capilar, com as discutidas intervenções no comportamento, lembrando que entre partículas de argila o contato se dá, salvo raras exceções, por meio da água (CARVALHO *et al.*, 2015, p. 777).

O potencial matricial (sucção matricial) é uma das componentes do potencial hidráulico nos solos não saturados e corresponde a uma das duas variáveis que definem o estado de tensões nos solos não saturados, sendo também a mais importante (FREDLUND e MORGENSTERN, 1977). Considera-se a sucção matricial igual à sucção total quando a água presente no solo é idêntica a água pura, restando apenas o efeito da matriz do solo. Por consequência, fica evidente a importância da determinação das propriedades de sucção para análise de problemas relativos ao comportamento hidráulico e mecânico dos solos não saturados (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015; MACHADO e VILAR, 2015).

Fredlund e Rahardjo (1993) demonstraram que os valores da parcela osmótica pouco interferem na sucção total. A sucção osmótica pode ser considerada constante em problemas que envolvem pequena variação no teor de umidade, sendo comumente considerada como de pequena relevância em problemas práticos (com exceção de problemas com contaminação de solos). Portanto, a sucção total do solo pode ser determinada, de uma forma simplificada, somente pelo valor da sucção matricial do solo, desconsiderando o fenômeno osmótico (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

A quantidade de água e a capacidade de retenção do solo estão diretamente relacionados com a pressão existente nos vazios e consequente energia a qual o solo está submetido (REINERT e REICHERT, 2006). Para obter a caracterização hidráulica dos materiais porosos, correlaciona-se a sucção do solo com a quantidade de água nele presente, resultando na curva de retenção de água no solo. Com esta curva é possível interpretar fenômenos relacionados ao fluxo, à resistência e à compressibilidade de solos não saturados (SOTO, 2004; GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

2.1.4 Curva de retenção de água no solo

Para compreender o comportamento da maioria dos processos em solos não saturados (condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento e mudanças de volume), é necessário analisar a distribuição, retenção e liberação da água em diversas situações, sejam elas mecânica ou ambiental. Fenômenos como infiltração, evaporação e alterações de tensão externa fazem com que a água se mova para dentro ou para fora do solo. Logo, ao utilizar uma curva definida em função da variação da energia necessária para remover a água (sucção) com a capacidade de retenção da mesma nos macroporos e microporos no interior do solo, é possível analisar o comportamento do mesmo sob a presença da água (FREDLUND, 2002; SOTO, 2004; GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

Em definição, a curva de retenção de água no solo é a representação gráfica da relação entre a umidade (grau de saturação, teor de umidade volumétrica ou gravimétrica) e a sucção (total, matricial ou osmótica) (SOTO, 2004). De acordo com autores como Fredlund (2002), Fredlund (2006) e Gitirana Jr. *et al.* (2015), a curva de retenção de água no solo é a propriedade mais importante na análise mecânica dos solos não saturados.

A curva de retenção de água no solo pode ser representada de diferentes formas, dependendo do tipo de informação que se quer retirar. Na curva representada em termos de grau de saturação, o valor inferior da sucção é função do nível de dessaturação e o máximo é igual a 1.000.000 kPa (valor teórico do solo seco) (EDLEFSEN e ANDERSON, 1943 *apud*. GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

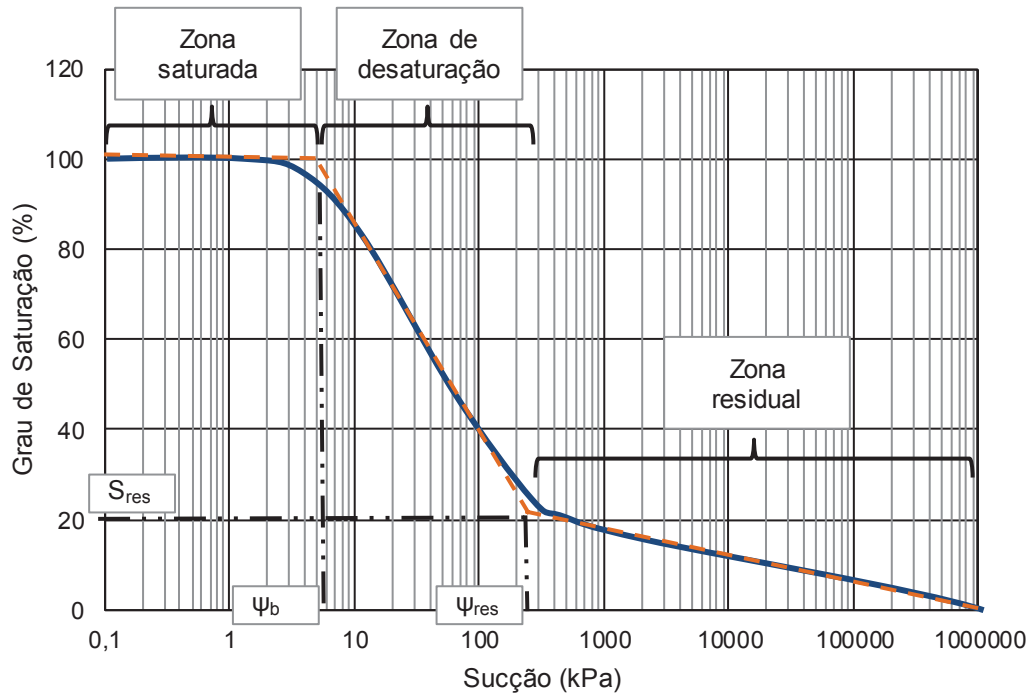
O teor de umidade volumétrica trata-se da relação do volume de água e o volume total do solo, e a curva de retenção de água no solo representada nesses termos tem como principal característica o valor máximo do teor de umidade ser correspondente à porosidade do solo. Por último, o grau de saturação efetivo é uma das possíveis representações da curva de retenção de água no solo, através da qual pode-se extrair a porcentagem de água relativamente livre armazenada no meio poroso (SOTO, 2004; GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

De acordo com Gitirana Jr. *et al.* (2015), a curva de retenção de água no solo pode ser dividida em três trechos, sendo que cada um deles corresponde à um parâmetro diferente. Na Figura 4, o primeiro trecho corresponde à zona saturada, a qual termina no valor de sucção em que há entrada de ar (ψ_b). Esta entrada de ar está diretamente relacionada à máxima sucção que os maiores poros do solo suportam sem que ocorra a drenagem.

O segundo intervalo de valores da sucção (ψ_{res}) corresponde à zona de dessaturação, na qual a água é drenada em termos de fluxo de água líquida, pois está em uma condição relativamente livre nos poros do solo. Por fim, o grau de saturação da zona residual (S_{res}) corresponde à saída da água relativamente menos livre do que no trecho anterior, que ocorre predominantemente por processos de transferência de vapor, associados à elevados valores de sucção (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

Em termos gerais, o teor de umidade volumétrico de um solo varia inversamente com o valor da sucção. A sucção se aproxima da nulidade quando o solo está totalmente saturado e a um valor máximo quando o grau de saturação tende a zero (solo seco).

Figura 4 – Parâmetros da curva de retenção de água no solo

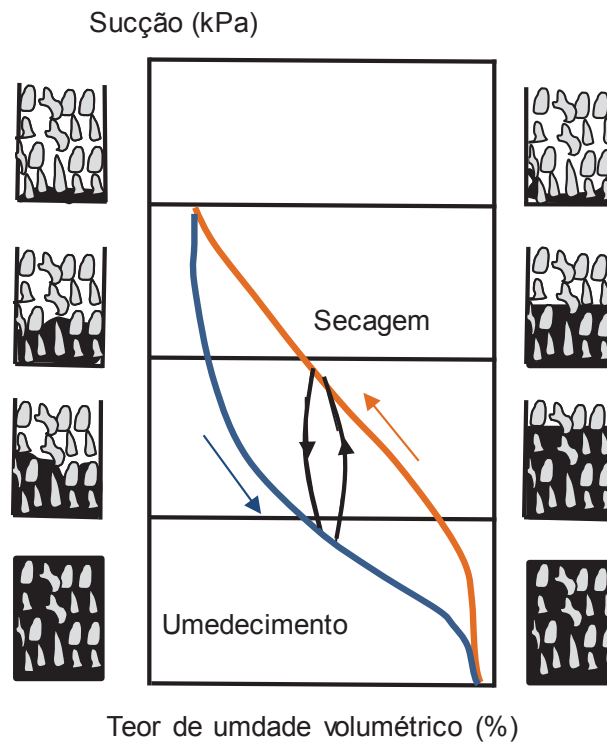


Fonte: adaptado de Gitirana Jr. *et al.* (2015)

A curva de retenção de água no solo descreve uma trajetória diferente em processos de secagem e umedecimento do material poroso, caracterizando o fenômeno denominado histerese (Figura 5). Isto ocorre devido à diversos fatores, entre eles cita-se: não conformidade dos poros, estando relacionados à diferentes quantidades de água; efeito do ângulo de contato, que é maior no umedecimento; presença de bolhas de ar; alteração da estrutura do solo durante a expansão e contração; entre outros (SOTO, 2004; GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

As curvas de retenção apresentam comportamentos distintos, que dependem da composição do solo, distribuição granulométrica, distribuição dos poros, estrutura e mineralogia das partículas. De uma maneira geral, os solos arenosos tendem a apresentar uma perda brusca de umidade, devido a ocorrência de poros maiores, que se esvaziam a uma dada sucção matricial. Os solos argilosos apresentam curvas mais suaves, devido à melhor distribuição dos poros, e assim conseguem reter a maior parte da água (GERSCOVICH, 2012). O grau de intemperismo é importante na determinação do formato da curva, principalmente para perfis de solos tropicais que apresentam variações nas propriedades hidráulicas com a profundidade (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

Figura 5 – Histerese das Curvas de Retenção de água no solo



Fonte: adaptado de Gerscovich (2012)

A curva de retenção de água no solo pode ser diferenciada de acordo com a mineralogia do solo, que age sobre a capacidade de absorção de água, onde materiais muito plásticos são influenciados pela adsorção de água na camada dupla por força de natureza eletroquímica. Outro fator, é a consolidação do solo, que reduz o tamanho dos poros e altera a curva de retenção de água no solo. Quanto mais compressível o solo, maior o efeito da redução de volume na sua curva de retenção de água no solo e, conseqüentemente, maior são os valores de sucção para drenar a água do solo. Finalmente, a condição de compactação também interfere na curva de retenção de água no solo de um material, através das diferentes distribuições de tamanhos de poros produzidas pelas diferentes condições de compactação (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

Existem materiais que apresentam curvas de retenção com formatos diferentes daquele que foi apresentado na Figura 4, pois a estrutura dos poros pode ser unimodal, bimodal ou trimodal. As curvas unimodais apresentam um único trecho de dessaturação, e a partir da derivada da curva de retenção de água no solo, pode ser avaliada a distribuição de frequências de tamanho de poros do material. Já curvas bimodais têm dois trechos de dessaturação, com dois valores de entrada de ar em

famílias de tamanhos de poros diferentes. De acordo com Gitirana Jr. *et al.* (2015), os solos bimodais resultam de diversos fatores, tais como: materiais que apresentam distribuições granulométricas descontínuas; porosidade do solo com microporos e macroporos formados por agregação física pelo processo de intemperismo; processos biológicos; e devido ao material ser compactado com baixa energia e no ramo seco.

Em geral, as relações matemáticas encontradas na literatura são para curvas do tipo unimodal, sendo que para os outros tipos de curva, deve-se encontrar equações que se ajustem aos diferentes patamares, a fim de se definir matematicamente o conjunto (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015; FERREIRA, 2017). Na Tabela 2 estão indicadas algumas equações empíricas encontradas em referências bibliográficas para ajuste da curva de retenção de água no solo, que foram pré-definidas a partir de dados obtidos experimentalmente.

De uma forma geral, quanto maior for o número de parâmetros, maior a capacidade de ajuste que a equação apresenta, além de aumentar a complexidade da função. De acordo com Gitirana Jr. *et al.* (2015), a equação de van Genuchten (Tabela 2) destaca-se por incluir um parâmetro adicional que aumenta a flexibilidade do seu formato. Além disso, esta curva é bastante utilizada em outras referências bibliográficas por permitir a utilização conjunta de um método analítico de previsão da condutividade hidráulica em solos não saturados, método este que foi proposto pelo mesmo autor (GITIRANA Jr. *et al.*, 2015).

Por último, destaca-se a equação proposta por Gitirana Jr. e Fredlund (2004) que possibilita o ajuste para curvas bimodais, pois apresenta dois valores de entrada de ar, além de dois pontos residuais. De acordo com Gitirana Jr. *et al.* (2015), apesar de apresentar certo grau de complexidade, a flexibilidade desta equação pode ser muito útil para os tipos de materiais que apresentam características bimodais.

Tabela 2 – Equações empíricas para ajuste da curva de retenção de água no solo

Autores	Equação	Parâmetros
VAN GENUCHTEN (1980)	$\theta = \theta_r + \left(\frac{(\theta_s + \theta_r)}{[1 + \alpha \psi ^n]^m} \right)$	n, m, α
McKEE e BUMB (1987)	$\theta = \frac{1}{\left(1 + \exp \left[\frac{(a_{m2} - \psi)}{n_{m2}} \right] \right)}$	a_{m2}, n_{m2}
FREDLUND e XING (1994)	$\theta = \frac{C(\psi) \theta_s}{\left[\ln \left(e + \left(\frac{\psi}{a_{fx}} \right)^{n_{fx}} \right) \right]^{m_{fx}}}$ $C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_{res}} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_{res}} \right)}$	$n_{fx}, m_{fx}, a_{fx}, \psi_{res}$
GITIRANA Jr. e FREDLUND (2004)	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_b \psi_{res}}} \right)^a} + S_2$	$\psi_b, \psi_{res}, S_{res}, a$

Fonte: adaptado de Gitirana Jr. (2015).

Onde:

ψ : sucção matricial (cm);

ψ_b : sucção matricial que corresponde à entrada de ar (cm);

ψ_{res} : sucção que corresponde à umidade volumétrica residual (cm);

θ : teor de umidade volumétrica (cm³/cm³);

θ_s : teor de umidade volumétrica de saturação (cm³/cm³);

θ_r : teor de umidade volumétrica residual (cm³/cm³);

e : 2,71828;

10^6 : valor limite de sucção para qualquer tipo de solo (kPa);

α, m, n, a : parâmetros de ajuste do solo;

S : grau de saturação.

2.1.5 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica é também um parâmetro que auxilia o entendimento do comportamento da água no solo. Enquanto a curva de retenção de água no solo representa a capacidade do solo em armazenar certa quantidade de água, a condutividade hidráulica (k) indica a capacidade do solo de transportá-la. Comumente, o termo condutividade hidráulica é usado para a permeabilidade do solo não saturado, enquanto o termo coeficiente de permeabilidade saturada usa-se para a condição saturada (BICALHO *et al.*, 2015).

Outro aspecto a se destacar é que para solos saturados, o coeficiente de permeabilidade saturada é função do índice de vazios, já os solos não saturados são dependentes também da quantidade de água presente nos vazios. Observa-se ainda que, independentemente do tipo de solo, a condutividade hidráulica permanece relativamente constante até o valor de entrada de ar, para, em seguida, decrescer rapidamente (BICALHO *et al.*, 2015).

Para a determinação da condutividade hidráulica, os métodos experimentais mostram-se mais complexos, por isso comumente utiliza-se de relações empíricas com outros parâmetros, tais como: coeficiente de permeabilidade saturada, teores de umidade saturado e residual, sucção de entrada de ar, além de parâmetros de ajustes. A Tabela 3 apresenta algumas das relações empíricas propostas em referências bibliográficas para se obter a curva de condutividade hidráulica para o solo não saturado (GERSCOVICH e GUEDES, 2004 *apud.* BICALHO *et al.*, 2015).

2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA SUCÇÃO

A determinação do potencial matricial é de fundamental importância na solução de problemas relativos ao comportamento hidromecânico dos solos não saturados. Na literatura existem diversos métodos de medição, controle e imposição da sucção, que têm por objetivo determinar parâmetros de entrada em análises comportamentais de materiais porosos. Cada técnica, tem processos, tipo de sucção medida e tempo de resposta diferenciados, além da forma de interpretação dos resultados depender da natureza do mecanismo de leitura. Em ensaios de campo, a técnica empregada é a de medição da sucção, já em laboratório, pode-se aplicar tanto a técnica da imposição como a da medição. Em todas as técnicas, é essencial que o

sistema esteja em equilíbrio com o sensor, para a correta determinação da relação da quantidade de água no solo com o seu estado de tensão (SOTO, 2004; MARINHO *et al.*, 2015).

Tabela 3 – Relações empíricas para definição da condutividade hidráulica

Modelo	Equação	Definição de variáveis
Gardner (1958)	$k = \frac{k_{sat}}{1 + a \left(\frac{\psi}{\rho_w g} \right)^n}$	ψ = Sucção a e n = Parâmetros de ajuste ρ = Densidade da água g = Aceleração gravitacional
Brooks e Corey (1968)	$k(\psi) = k_{sat} \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\eta \rightarrow \psi > \psi_b$ $k(\psi) = k_{sat} \rightarrow \psi \leq \psi_b$	ψ_b = Sucção de entrada de ar ψ = Sucção η = Parâmetros de ajuste
Arbhabhirama e Kridakorn (1968)	$k = \frac{k_{sat}}{\left(\frac{\psi}{\psi_b} \right)^{n'} + 1}$	ψ = Sucção ψ_b = Sucção de entrada de ar η' = Parâmetros de ajuste
Campbell (1974)	$k = k_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3}$	θ_s = Teor de umidade volumétrica saturada b = Parâmetro de ajuste
Van Genuchten (1980)	$k(S) = k_{sat} S^l \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2$ $S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	θ_r = Teor de umidade volumétrica residual θ_s = Teor de umidade volumétrica saturada S = Grau de saturação no solo m = Parâmetro de ajuste l = 0,5
Fredlund <i>et al.</i> (1994)	$k = k_{sat} \frac{\sum_{i=j}^n \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{(e^{yi})} \theta'(e^{yi})}{\sum_{i=j}^n \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{(e^{yi})} \theta'(e^{yi})}$	k_s = permeabilidade saturada; θ_s = teor de umidade volumétrico saturado; ψ = sucção; e = 2,71828; y = variável de integração que representa o logaritmo da sucção; θ' = primeira derivada da curva característica; i = intervalo entre j e n; j = a menor poro pressão negativa descrita pela função final; n = a maior poro pressão negativa descrita pela função final.
Vanapalli e Lobbezoo (2002)	$k_{rel} \approx 10^{(7,9 \log S^\gamma)}$ $\gamma = 14,08(I_p)^2 + 9,4(I_p) + 0,75$	$k_{rel} = k/k_{sat}$ S = Grau de saturação I_p = Índice de plasticidade

Fonte: adaptado de GERSCOVICH e GUEDES (2004) *apud*. BICALHO *et al.* (2015)

As amostras necessárias para a realização do ensaio em laboratório devem ser indeformadas, de forma que representem a estrutura, o nível de tensões, o teor de umidade e o grau de saturação fidedignas às condições do solo estudado. Outro

ponto a ser observado é o fenômeno de histerese (já comentado em 2.1.4) no qual o grau de saturação na trajetória de secagem é maior que na trajetória de umedecimento, para o mesmo valor de sucção. O uso da trajetória de secagem na determinação da curva de retenção de água no solo é mais comum na literatura devido, principalmente, por ser de mais fácil execução (SOTO, 2004; MARINHO *et al.*, 2015).

A curva de retenção de água no solo geralmente é determinada sob tensão total nula, sendo importante medir as condições iniciais de sucção e o seu respectivo teor de umidade e grau de saturação. O ensaio a partir da secagem pode ser feito por saturação do corpo de prova, de forma lenta, através de uma placa de sucção ou ainda, por absorção de água pela base. Outro aspecto importante é a medição do volume total de corpos de prova durante o ensaio para o cálculo do teor de umidade volumétrico e do grau de saturação (SOTO, 2004; MARINHO *et al.*, 2015).

Há diversos métodos de determinação da curva de retenção de água no solo, dentre eles podemos citar: a placa de sucção, a placa de pressão, o método do papel filtro, o método do equilíbrio de vapor, potenciômetro de ponto de orvalho, tensiômetros, blocos porosos, sensores de condutividade elétrica, entre outros (SOTO, 2004). Neste trabalho foi utilizado a técnica do papel filtro para a determinação da sucção, além de leituras em campo de tensiômetros.

2.2.1 Ensaio do papel filtro

O ensaio do papel filtro é uma técnica indireta da medição da sucção total e matricial do solo, em um intervalo de sucção entre 0,1 e 100.000 kPa, além de ser um dos métodos mais simples e econômico de se obter a curva de retenção de água no solo (ASTM D 5298, 2003). Este método permite a medição da sucção através da imposição de variados teores de umidade e determinação de seus correspondentes valores de pressão da água nos poros. Normalmente, recomenda-se o uso de uma amostra para cada ponto de teor de umidade, devido à dificuldade de controlar a perda de água durante o processo de aumento de sucção (FREDLUND e RAHARDJO, 1993; MARINHO *et al.*, 2015).

Este método é normatizado pela ASTM D 5298 (2003), e consiste em colocar o papel filtro, com determinada porosidade e capacidade de absorção de água, em contato com o solo em ambiente hermético, a fim de se obter um equilíbrio das

sucções entre os dois materiais. Para a medição da sucção matricial, o contato do papel é direto com as partículas do solo, e mede-se as tensões capilares desenvolvidas nesse processo. Já para se obter a sucção total, deve ocorrer o fluxo em forma de vapor, ou seja, sem contato direto do papel com o solo, para assim representar as forças capilares e osmóticas de retenção da água (MARINHO *et al.*, 2015).

De acordo com Marinho *et al.* (2015) o papel filtro mais usado é o Whatman N° 42 e o Sheleicher & Shuell N° 589, sendo que o tempo de equilíbrio é um fator de extrema importância para a obtenção da sucção correta. Ainda segundo os autores, há uma discordância no meio técnico-científico quanto à recomendação da norma ASTM D 5298 de secar por 16 horas o papel filtro na estufa, pois isto pode alterar a capacidade de absorção do papel, sendo a melhor alternativa usar os papéis diretamente da caixa, que deve ser mantida em local protegido de umidade.

O emprego de curvas de calibração se faz necessário para se obter a relação entre o volume da água no papel filtro com a sucção do solo, pois o estado de equilíbrio fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, mas com umidades diferentes. Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), as curvas de calibração provêm de um gráfico de dispersão que relaciona o teor de umidade gravimétrica e a sucção do solo em escala logarítmica. A transição entre as porções úmida e seca da curva de calibração ocorre quando o teor de água no papel filtro é próximo àquele relacionado à sua curva de calibração. Ao adotar o papel filtro qualitativo Whatman N° 42 para a execução desse ensaio, deve-se usar equações de calibração, tais como as apontadas na Tabela 4 (CHANDLER *et al.*, 1992 *apud.* MARINHO *et al.*, 2015):

Tabela 4 – Equações de calibração para o papel filtro Whatman N° 42

w_{papel}	Sucção (kPa)
$\leq 47\%$	$10^{4,84-0,0622 w_{papel}(\%)}$
$> 47\%$	$10^{6,05-2,48 \log [w_{papel}(\%)]}$

Fonte: adaptado de Chandler *et al.* (1992) *apud.* Marinho *et al.* (2015)

Por conseguinte, a qualidade dos resultados depende da aplicação rigorosa do método do ensaio pelo usuário, com cuidadosa operação na hora da pesagem e do manuseio, assim como a garantia do adequado contato entre o papel e solo na

medição da sucção matricial. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), é importante observar um tempo mínimo de equilíbrio de uma semana para a sucção matricial, enquanto a sucção total pode levar cerca de um mês. Ainda de acordo com os autores, o papel filtro deve ser retirado do local de equilíbrio sem que haja perda significativa de umidade, entre 3 e 5 segundos, além dos cuidados no manuseio do papel. Deve-se utilizar uma balança de precisão da ordem de 0,001 gramas. De maneira geral, trata-se de um bom método de obtenção da curva de retenção de água no solo, de forma simples, relativamente rápida e econômica, sendo que apresenta precisão similar ou até melhor do que outros métodos convencionais (SOTO, 2004).

Soto (2004) realizou diversas medições de retenção de água, de acordo com vários métodos existentes, a fim de comparação e aferição entre as técnicas disponíveis. O autor concluiu que todos os métodos testados apresentaram dispersão com variabilidade menor que 10%, o que está dentro da faixa correntemente observada em ensaios rotineiros da mecânica dos solos. O autor observou também que o método do papel filtro mostrou resultados mais heterogêneos, seguido do método osmótico, do tensiômetro de alta capacidade e por último do método de translação de eixos. Ainda segundo o autor, a maior variabilidade de resultados para o papel filtro deve-se, possivelmente, às dificuldades e à precisão das pesagens do papel que fazem parte deste método (SOTO, 2004).

2.2.2 Tensiômetro

Na prática da engenharia geotécnica, existe uma gama de instrumentos desenvolvidos para a medição de sucção no campo, entre eles cita-se os tensiômetros e o sensor de matriz granular (GMS). A maioria destes instrumentos de campo mede a sucção matricial, pois é a parcela da sucção total com maior relevância no estudo do comportamento do solo (MARINHO *et al.*, 2015). A seguir é abordado, de maneira geral, sobre a medição da água no solo com o tensiômetro, que foi o instrumento usado para auxiliar nos resultados deste projeto.

Os tensiômetros apresentam diversas dimensões e geometrias, que podem ter uso em campo e em laboratório, apesar da aplicação *in situ* ser a mais comum. O tensiômetro instalado *in situ* monitora o comportamento do solo em relação à absorção da água pluvial, em uma determinada profundidade. A utilização do tensiômetro possibilita a medição direta da poro pressão negativa da água do solo, ou seja, o valor

da sucção matricial. Esta medida não inclui a sucção osmótica, pois o sistema de medição do tensiômetro permite a passagem dos sais solúveis. Indiretamente, obtém-se o nível de saturação do solo através do valor da pressão medida na ponta do equipamento (MARINHO *et al.*, 2015).

A interface de contato do solo-tensiômetro é feita através de uma ponteira porosa (geralmente cerâmica com alto valor de entrada de ar), que permite o equilíbrio entre a água do dispositivo e a do solo, sem permitir a entrada de bolhas de ar no sistema. O equipamento é composto também por um compartimento interno que contém água pressurizada, além de um dispositivo para medição da pressão da água no solo. Este dispositivo de medição da pressão pode ser de três tipos: manômetro de mercúrio, manômetro de vácuo e transdutor elétrico de pressão (AZEVEDO e SILVA, 1999; MARINHO *et al.*, 2015). Na Figura 6 encontra-se um exemplo de tensiômetro para medições em campo, o qual foi utilizado nesta pesquisa.

Figura 6 – Exemplo de tensiômetros utilizados na pesquisa



Fonte: O autor

O princípio de funcionamento do tensiômetro baseia-se no deslocamento de uma membrana, que induz à uma variação de resistência do sistema, ou seja, variação de tensão. À medida que o solo seca, a água sai do equipamento através da cápsula

porosa, gerando um vácuo no interior do tubo equivalente à tensão da água no solo, que por sua vez é medido através do manômetro. No caso de um evento pluviométrico, a umidade presente no solo aumenta, e, conseqüentemente, a água passa do solo para o tensiômetro através da cápsula e as leituras de vácuo ficam mais baixas. À vista disso, quanto menor a umidade presente no solo, a água do tensiômetro registrará maiores sucções, devido ao equilíbrio que ocorre entre os meios interno e externo (AZEVEDO e SILVA, 1999).

O tensiômetro apresenta como limite de operação o ponto em que a água, sob vácuo, entra em processo de cavitação. Em consequência disso, a máxima pressão negativa corresponde ao ponto em que começa a expansão de microbolhas de ar no sistema, que corresponde à transformação da fase líquida para gás devido à queda de pressão. Entre os cuidados necessários para contornar a cavitação, estão: utilizar água deaerada por processos como vácuo, vácuo sob agitação e fervura ou, ainda, aplicar o vácuo no tensiômetro preenchido de água, afim de remover a maior quantidade de ar possível aprisionado nas microcavidades (AZEVEDO e SILVA, 1999; MARINHO *et al.*, 2015).

Além disso, alguns cuidados devem ser tomados para a manutenção do equipamento em campo. Quando o solo está seco, cai o nível de água no interior do tensiômetro, criando um vácuo no espaço livre de água. Quando ele umedece, o vácuo diminui determinando elevação da água ao seu nível original. Em decorrência dos ciclos de umedecimento e secagem, parte do ar vindo do solo é preso na parte superior do tensiômetro, acarretando leituras abaixo dos valores reais de tensão. Dessa maneira, uma das tarefas de manutenção mais importante é, regularmente, retirar esse ar e substituí-lo por água (AZEVEDO e SILVA, 1999).

Portanto, as principais limitações do equipamento estão relacionadas às leituras máximas de registro, problemas de cavitação, necessidade de manutenção constante e reposição de água no equipamento. De acordo com Azevedo e Silva (1999), no geral toma-se o valor de 80 kPa como limite de leitura máxima de operação do tensiômetro. Ainda de acordo com os autores, para o mesmo nível de tensão, os solos argilosos retêm mais água que os arenosos, assim o tempo para esgotamento da água armazenada no primeiro será maior que no segundo.

2.3 ESTABILIDADE DE TALUDES

Toda superfície inclinada encontrada no relevo, seja natural ou artificial (cortes e aterros), recebe a designação de talude (ZARUBA e MENCL, 1969). De acordo com o conceito de equilíbrio geomorfológico, toda escarpa permanece em um estado de equilíbrio estável de balanço, até que ocorra um evento que cause mudanças no fluxo da matéria e, conseqüentemente, provoque movimentos de massa para reajustamento dos componentes do sistema (GOERL *et al.*, 2012; FIERZ, 2016). Esta instabilidade pode ser causada pelo aumento da sollicitação, como por exemplo, sobrecarga, sollicitações dinâmicas e pressões laterais, ou pela redução da resistência ao cisalhamento, associada às características geomecânicas do material (VARNES, 1978).

Entretanto, deve-se destacar que movimentos de massa constituem o processo natural de evolução do relevo montanhoso, em clima úmido, e podem ser observados com certa frequência em escarpas naturais de dimensões e declividades diversas (MINEROPAR, 2013). Ações como o intemperismo e desgastes físicos alteram a condição de resistência do maciço de solo e/ou rocha com o passar do tempo, e isto pode gerar o cenário propício para a movimentação da massa (GERSCOVICH, 2012). De qualquer maneira, o deslocamento de massa ocorre quando as tensões cisalhantes mobilizadas atingem a resistência ao cisalhamento do material.

De maneira geral, o termo movimento gravitacional de massa (MGM), refere-se ao deslocamento simultâneo de matéria, seja ela rocha, solo, vegetação ou água, ao longo de uma superfície inclinada, por efeito da força da gravidade (ZARUBA e MENCL, 1969; VARNES, 1978). São vários os fatores que podem ser responsáveis pela desestabilização de um talude, dentre eles podemos citar: declividade, umidade e material do talude, além de características locais, como temperatura, nível topográfico acima do mar e regime de chuvas (ZARUBA e MENCL, 1969; VARNES, 1978; MINEROPAR, 2013). Diversas classificações são encontradas nas referências bibliográficas para descrever os tipos de movimentos de massa, que são dependentes da forma e da velocidade do deslizamento (HUTCHINSON, 1968; VARNES, 1978; GUIDICINI E NIEBLE, 1984).

A classificação de Varnes (1978) é uma das mais difundidas na literatura, apesar de existirem estudos de classificação mais especificados, que para o Brasil,

seriam as propostas para ambientes tropicais (COSTA NUNES, 1969; VARGAS, 1985; AUGUSTO FILHO, 1992). Varnes (1978) divide os movimentos de massa em cinco tipos: queda, tombamento, deslizamento, espalhamento e fluxos, os quais podem envolver três tipos de materiais: rochas, terra e detritos. A categoria de deslizamentos se subdivide ainda em rotacional e translacional (VARNES, 1978). O deslizamento que mais ocorre na Serra do Mar é o translacional (planar), e na maioria dos casos é registrada a ocorrência após eventos de chuva (LOPES, 2013; MINEROPAR, 2013).

Nos últimos anos, diversos autores realizaram pesquisas na Serra do Mar, com fins de entender a dinâmica dos deslizamentos de taludes, relacionando-os à diversos fatores como regime de chuvas e comportamento da água no solo (ABRAMENTO e CARVALHO, 1989; LIMA, 2001; YOMURA, 2008; TONUS, 2009; GEOPLANEJAMENTO, 2011; FERREIRA, 2012; MINEROPAR, 2013; LOPES, 2013; FARIAS, 2013; BORA, 2015, GODOY, 2015; LISTO, 2015; MOSCATELI, 2017; FERREIRA, 2017; entre outros).

De acordo com Lopes (2013) e Mineropar (2013) os deslizamentos translacionais são os mais recorrentes e representativos do cenário de instabilidade na área urbana de Antonina. Neste tipo de deslizamento, a superfície de ruptura tem forma planar, geralmente condicionada pela presença de estruturas geológicas como planos de estratificação, foliação, fraturas e contatos entre solo e rocha. A velocidade de deslocamento é rápida, se comparada com os demais tipos de movimentos, e são comumente deflagradas em escarpas de declividades elevadas com presença de solos rasos. O deslizamento rotacional apresenta superfície de deslocamento côncava, no qual o material se desloca em torno de um eixo imaginário, podendo apresentar vários planos de movimentos paralelos. Além da profundidade de ruptura ser maior do que o planar, o deslizamento rotacional pode ser lento ou rápido, sendo comum ocorrer em locais que apresentam homogeneidade de material (VARGAS, 1985; AUGUSTO FILHO, 1992).

Listo (2015) estudou cenários de suscetibilidade em modelo TRIGRS na Bacia do Rio Guaxinduba, e observou importantes relações entre a instabilidade e os valores de coesão do solo, especialmente entre os valores de 0 kPa a 6 kPa. O autor também pontua que há maior suscetibilidade nas áreas com densidade entre 17 kg/m³ e 18 kg/m³ e ângulo de atrito interno entre 31° e 35°. Ferreira (2017) analisou o tempo de infiltração em diferentes cenários de chuva e sua influência na condição de

estabilidade por meio de modelagem numérica. Dentre os principais resultados, a autora destaca que a curva de retenção de água no solo apresentou característica trimodal, com definição matemática sugerida no estudo.

Lopes (2013) estudou a influência da distribuição espacial da espessura e da umidade do solo na estabilidade de uma encosta no município de Antonina. O autor utilizou as características pedológicas obtidas em ensaios de laboratório e dados de precipitação relativos ao evento ocorrido no dia 11 de março de 2011. Dos resultados obtidos, o autor destaca que a declividade foi o principal fator de influência na determinação do fator de segurança (FS). Além disso, a distribuição espacial da espessura do solo e a variação dos dados geotécnicos melhoraram o desempenho das simulações em 12%, quando comparado ao cenário uniforme.

Futai e Suzuki (2010) estudaram perfis de infiltração em solos não saturados compostos por uma camada superficial de solo coluvionar, na Serra do Mar. Os autores realizaram ensaios de curva de retenção de água no solo e, a partir deles, obtiveram os valores de condutividade hidráulica. De acordo com os resultados da pesquisa, observou-se que o ajuste da curva de retenção de água no solo mais adequado para o solo coluvionar é considerar a distribuição de poros bimodais. Futai e Suzuki (2010) observaram também que a sucção ao longo dos solos coluvionares permaneceu baixa quando comparada com um mesmo perfil em solo residual, devido à diferença entre a capacidade de retenção de água e da variação da condutividade hidráulica.

O estudo realizado por Mineropar (2013) teve por objetivo mapear os pontos mais suscetíveis a deslizamentos na área urbana do Município de Antonina, para ser usado como ferramenta para evitar ou reduzir os efeitos de desastres naturais na cidade. De acordo com o autor, dos levantamentos de deslizamentos registrados em março de 2011, constatou-se que cerca de 80% se deram entre as declividades de 24° e 45°, enquanto somente 2,5% foram registrados em declividades acima de 45°. Dos 115 movimentos de massa cadastrados, 62,5% localizavam-se em encostas convergentes, enquanto os restantes localizavam-se sobre divisores d'água, caracterizados como divergentes (MINEROPAR, 2013).

Ainda de acordo com os resultados obtidos por Mineropar (2013), nenhum fator isolado, como forma de encosta, declividade, tipo e espessura do material, entre outros, explica a distribuição preferencial dos deslizamentos gerados em março de 2011 em Antonina. O autor conclui que a própria natureza do desastre, com chuvas

extremamente intensas, levou à superação de todos os parâmetros geotécnicos de estabilidade do terreno, e os eventos ocorreram sob condições muito variadas de controle geológico e geomorfológico (MINEROPAR, 2013). Isto posto, Mineropar (2013) recomenda que sejam realizadas pesquisas que permitam aprofundar o conhecimento sobre os processos envolvidos na ocorrência de movimentos de massa, na área urbana de Antonina e em outras encostas do litoral paranaense.

A nível mundial, um dos grandes centros de pesquisa na área está no continente asiático, principalmente China, Japão, Hong Kong e Coréia (CHEN e LEE, 2004; AYALEW, 2005; LYU *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2017; LYU *et al.*, 2018; entre outros). Isto porque o continente asiático é o mais propenso a desastres naturais em termos de ocorrência, número de mortes e prejuízos econômicos (CRED, 2017). Em 2017, o continente asiático experimentou a mais alta ocorrência de desastres naturais (eventos pluviométricos extremos, deslizamentos, corridas de detritos, abalos sísmicos, entre outros), 43% do total de eventos em todo o mundo (CRED, 2018). Em relação ao ano de 2017, a China foi o país mais afetado por desastres, com 25 eventos, sendo 15 deles inundações e deslizamentos de terra (CRED, 2018). Devido à recorrência de eventos nestes locais, há grande concentração de pesquisas na área de deslizamentos de terra, nas quais as mais recentes envolvem modelagem em ambiente SIG, uso de probabilidade, e análise sob condição não saturada.

De acordo com Chen e Lee (2004) os deslizamentos de terra em Hong Kong são resultado da degradação natural de superfícies de alta declividade na região, além da influência de tempestades tropicais durante a estação chuvosa. A maioria dos deslizamentos caracterizam-se como rasos, e com superfície de ruptura perto da superfície inferior do talude, muitas vezes causada por erosão devido ao fluxo de água superficial ou infiltração superficial. Os autores verificaram que a infiltração de chuva nos solos não saturados com frequência resulta em grandes mudanças na sucção, o que pode ser o prelúdio da instabilidade.

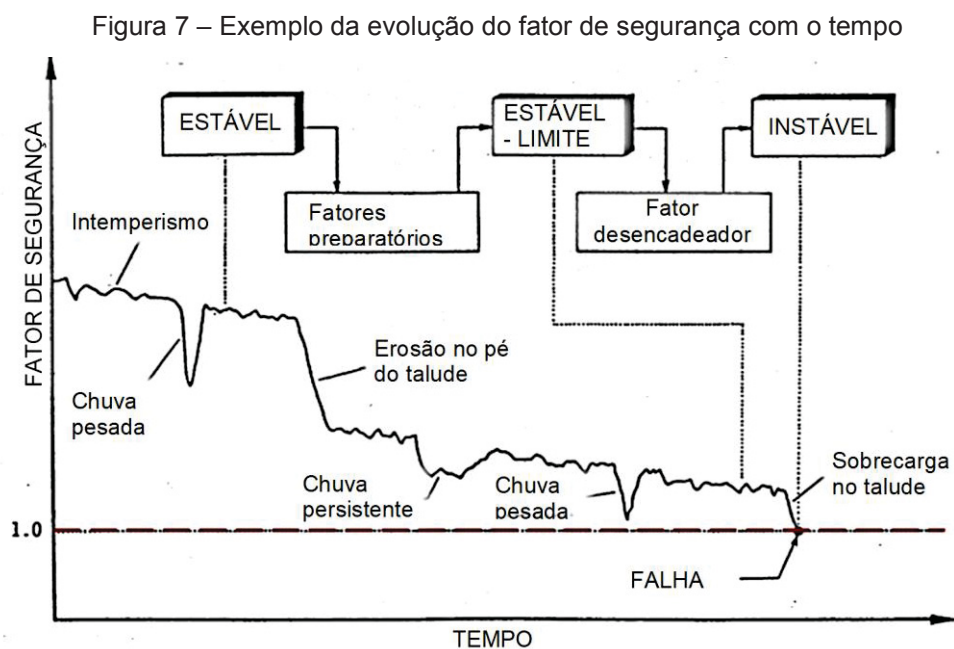
2.3.1 Fatores predisponentes à ocorrência de movimentos de massa

Os agentes deflagradores de movimentos de massa podem ser divididos entre fatores intrínsecos e fatores extrínsecos. Os fatores intrínsecos são condicionantes e potenciais, pois envolvem características das rochas e solos, da estrutura geológica, da forma da encosta, do clima, da hidrologia e da vegetação. As características do

material envolvido, como sua espessura, densidade, porosidade, condutividade hidráulica, resistência mecânica, entre outros, podem ser determinantes para o deslizamento, tanto quanto a presença de desdobramentos e falhas na rocha. Já os fatores extrínsecos estão relacionados com o agente desencadeador do deslizamento, como por exemplo, a ocorrência de terremotos, erupção, abalos sísmicos, interferência humana, água de degelo, peso da neve ou chuvas intensas (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

De acordo com Guidicini e Nieble (1984), a causa de um deslizamento pode ser entendida como o modo de atuação de um determinado agente na instabilização de uma escarpa, e podem ser classificadas como internas, externas ou intermediárias. Dentre as causas internas, destaca-se o efeito das oscilações térmicas, e a redução dos parâmetros de resistência por intemperismo, enquanto as externas estão relacionadas a mudanças da geometria do sistema, efeitos de vibrações, e mudanças naturais na inclinação das camadas. Por último, as causas intermediárias dizem respeito à elevação do nível piezométrico e da coluna de água na massa do solo, rebaixamento rápido do lençol freático, erosão subterrânea e diminuição da coesão aparente (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

Popescu (2002) destaca que a perda de estabilidade de um talude deve-se à um conjunto de fatores envolvidos, na qual o fator de segurança varia em função do tempo, com variações sazonais, conforme o exemplo mostrado na Figura 7.



Fonte: adaptado de Popescu (2002)

Na Serra do Mar, local de estudo deste trabalho, as características climáticas têm forte influência sobre o meio, favorecendo intenso processo de alteração físico-química. Outro aspecto determinante deste local é a alta declividade das encostas, que faz com que ocorra constante remoção das camadas superficiais. Já a deflagração de deslizamentos translacionais rasos pode ser explicada pela cobertura pedológica não homogênea, com presença de variações que definem o plano de ruptura raso (GEOPLANEJAMENTO, 2011; MINEROPAR, 2013).

2.3.1.1 Características geológicas-geotécnicas

As características apresentadas pelo solo e rocha podem influenciar de diversas maneiras a estabilidade de um talude. Quanto maior for a espessura do material inconsolidado, maior será a quantidade de volume disponível para concentrar umidade que, conseqüentemente, desenvolverá maiores tensões cisalhantes por efeito da força da gravidade. Porém, vale a pena destacar, que solos mais rasos podem se saturar e romper rapidamente por efeito da liquefação. Em relação à estrutura química, solos com presença de argilominerais podem contribuir na instabilização devido à capacidade de armazenamento de água entre as lâminas desses minerais (LOPES, 2013).

Propriedades físicas do solo, como textura e estrutura, estão intimamente ligadas à coesão, coeficiente de permeabilidade saturada, nível freático e poro pressão que o mesmo apresenta. Wang e Sassa (2003), ao realizaram experimentos com chuvas, destacam que a ocorrência de grãos mais finos no solo propicia poro pressões maiores, além do deslizamento apresentar velocidades superiores e romper antes do que em solos de granulometria mais grossa. As discontinuidades dos solos como falhas, fraturas, junções e laminação, além dos depósitos de encosta, favorecem o acúmulo de água e o aumento da pressão, que contribuem para seu intemperismo e maior fragilidade. A ocorrência de fraturas reliquiares no maciço gera planos de preferência para a ocorrência do intemperismo, sendo assim, condicionantes de fraturamentos (FERNANDES e AMARAL 1996).

Os solos saprolíticos, de uma maneira geral, são solos jovens, menos evoluídos e que conservam minerais, texturas e estruturas reliquiares da rocha matriz, como os feldspatos, quartzo e micas. Este tipo de solo caracteriza-se pela coloração

heterogênea, exceto onde se desenvolvem sobre rocha homogênea e de grão fino. Além disso, os solos saprolíticos apresentam alta erodibilidade e altos limites de liquidez e plasticidade, o qual geralmente permanece coberto pela camada de solo laterítico, que caracteriza o perfil residual das regiões tropicais de um modo geral, e em particular a região do litoral paranaense (MINEROPAR, 2013).

Os solos lateríticos (maduros e mais superficiais) são produtos do processo de laterização, típica das regiões com estações quentes e úmidas alternadas a estações frias e relativamente secas, e possuem argilominerais de baixa expansibilidade e alta resistência à compactação. A homogeneidade cromática e a ausência de minerais (exceto quartzo e outros resistatos) e estruturas da rocha matriz são características dos solos lateríticos, e suas cores diagnósticas são em tons de vermelho, amarelo, laranja e castanho (bruno), o que facilita a sua identificação no campo. A laterização ocorre em solos bem drenados e evolui da superfície para a base do perfil, de modo que as camadas de solo laterítico recobrem as camadas de solo saprolítico. Das suas propriedades geotécnicas, destaca-se a baixa erodibilidade e os baixos limites de liquidez e plasticidade (MINEROPAR, 2013).

Os colúvios são formados por rolamento e rastejo de materiais detríticos, sendo que as camadas superiores destes depósitos favorecem a infiltração rápida da água superficial, pois apresentam permeabilidade vertical maior do que a horizontal. Nos locais onde o depósito coluvionar está sobre o solo residual, o primeiro acaba funcionando como barreira hidráulica, acumulando água na base do depósito transportado, o que pode provocar movimentos de massa. Os colúvios podem sofrer processos pedogenéticos, assumindo feições de solo residual e laterizando-se, com baixa massa específica aparente e alta condutividade hidráulica, o que também favorece a formação de deslizamentos planares rasos (MINEROPAR, 2013).

2.3.1.2 Características geomorfológicas

De maneira geral, quanto mais íngreme for um terreno, maior será a propensão a deslizamentos, além de aumentar a velocidade de deslocamento do material, e a capacidade de transporte. Declividades maiores que 25° podem favorecer o desenvolvimento de tensões cisalhantes, através da força da gravidade, na cobertura de material inconsolidado (SIDLE *et al.*, 1985 *apud*. MINEROPAR, 2013). De acordo com o levantamento dos deslizamentos ocorridos em março de 2011 na

área urbana de Antonina, estes ocorreram em encostas com declividade entre 25° e 35°. Juntamente com a declividade, a amplitude vertical do relevo contribui para o aumento de energia e de água acumulada, que é transportada ao longo da encosta no caso de uma ruptura (MINEROPAR, 2013).

A forma da encosta (plano e perfil de curvatura), influencia na distribuição e movimentação da água na superfície e no subsolo. A área de contribuição da drenagem na bacia, na qual a encosta está inserida, é diretamente proporcional ao volume de água drenada em direção ao seu eixo, por isso, combinada com outros fatores, auxilia no evento de instabilidade. Locais paralelos às curvas de níveis, que acumulam água precipitada e favorecem a infiltração, aumentam a suscetibilidade a deslizamentos. De maneira geral, formas côncavas favorecem a concentração da água e sedimentos enquanto formas convexas propiciam a divergência do escoamento, apesar desta última favorecer o deslocamento lateral (FERNANDES e AMARAL, 1996; MINEROPAR, 2013).

2.3.1.3 Influência da infiltração de água no solo

Em países de clima tropical úmido, a dinâmica pluviométrica tem influência direta e determinante na deflagração de movimentos de massa. Durante o evento pluviométrico, ocorre a frente de infiltração da água no solo (aumento da umidade), que acarreta perda de sucção e coesão efetiva. Isto diminui a resistência ao cisalhamento do solo e, conseqüentemente, pode ocorrer a ruptura do talude sem que a condição de saturação completa seja alcançada (GERSCOVICH *et al.*, 2015). Processos de erosão interna podem ocorrer se o talude interceptar o lençol freático, e isto gera instabilidade pois a coesão aparente varia com a umidade. O ciclo de umedecimento e secagem pode comprometer a estrutura da superfície inclinada, devido à geração de fissuras e aumento da porosidade, além do conseqüente acréscimo de água e aumento de poro pressão (GAO, 1993 *apud*. LISTO, 2015).

Quando ocorre um evento pluviométrico sobre um solo não saturado, pode acontecer o escoamento superficial e subsuperficial, além de infiltrar no terreno. A infiltração é um processo essencialmente vertical, devido às forças capilares e gravitacionais, por meio do qual a água penetra no solo, ou seja, refere-se ao fluxo que ocorre na interface solo-atmosfera. O escoamento pode acontecer se o solo atingir a saturação, ou quando a intensidade de chuva é maior que a capacidade de

infiltração, assim a água escoou pela superfície mesmo com o solo ainda em condição não saturada (BORMA *et al.*, 2015; GERSCOVICH *et al.*, 2015).

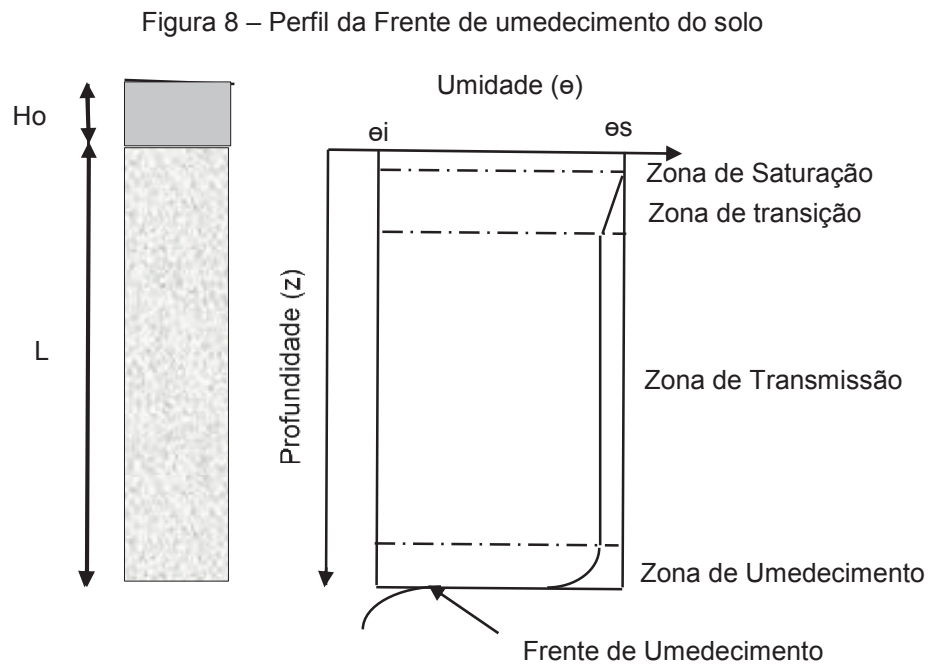
A taxa de infiltração em uma encosta depende da capacidade de infiltração do solo (dirigido pela condutividade hidráulica da região superficial e da intensidade de chuva), e do efeito *run-off*, que varia de acordo com a inclinação do talude, da cobertura vegetal e condições iniciais de umidade e poro pressão correspondente (HILLEL, 1971; BORMA *et al.*, 2015). Com a saturação superficial e a gradual saturação do solo ao longo da profundidade, a infiltração decresce até uma taxa residual. (BORMA *et al.*, 2015; GERSCOVICH *et al.*, 2015).

De acordo com Carvalho e Silva (2006), se o solo estiver muito seco ocorre uma alta taxa de infiltração no início do processo de infiltração, que tende a diminuir com o tempo e aproximar-se de um valor constante, conhecido por velocidade de infiltração básica da água no solo (VIB). A frente de umedecimento em pequenas profundidades provoca um elevado gradiente hidráulico e uma taxa de infiltração alta. Com o avanço da frente de umedecimento na profundidade, o gradiente hidráulico tende à unidade e, conseqüentemente, a taxa de infiltração tende a ser igual à condutividade hidráulica do solo saturado, a qual aproxima-se do valor da VIB (CARVALHO E SILVA, 2006).

Se o solo estiver numa condição inicial úmida, este apresentará a princípio uma menor taxa de infiltração devido a um menor gradiente hidráulico. Ou seja, o solo apresenta menor diferença no potencial matricial da água no solo, fazendo com que a taxa de infiltração se torne constante mais rapidamente. Portanto, a taxa de infiltração depende diretamente da textura e estrutura do solo, além do teor de umidade - que varia na época da chuva ou irrigação - e da existência de camada menos permeável ao longo do perfil (CARVALHO E SILVA, 2006). O perfil típico de umidade do solo, durante a infiltração, está apresentado na Figura 8.

A zona de saturação compreende uma fina camada (cerca de 1,5 cm) na qual o solo está com um teor de umidade igual ao teor de umidade de saturação, e logo após tem-se a zona de transição, cujo teor de umidade decresce rapidamente com a profundidade (CARVALHO E SILVA, 2006). De acordo com Carvalho e Silva (2006), a zona de transmissão é a região do perfil através da qual a água é transmitida, e apresenta pequena variação da umidade em relação ao espaço e ao tempo. Ainda segundo os autores, a zona de umedecimento é caracterizada por uma grande redução no teor de umidade com o aumento da profundidade. Por fim, durante a

infiltração, a frente de umedecimento compreende uma pequena região com grande gradiente hidráulico e uma variação bastante abrupta da umidade. Ou seja, a frente de umedecimento representa o limite visível da movimentação de água no solo (CARVALHO E SILVA, 2006; BORMA *et al.*, 2015; GERSCOVICH *et al.*, 2015).

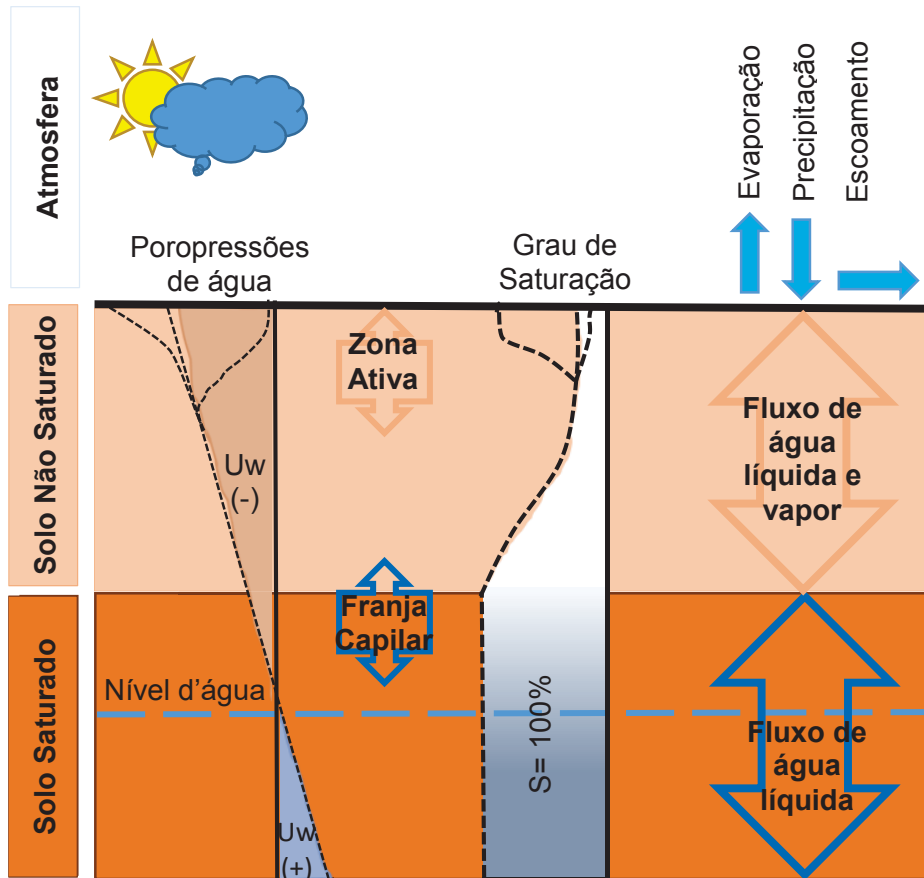


Fonte: adaptado de Carvalho e Silva (2006)

No local onde o solo apresenta o horizonte não saturado, a frente de saturação vai se formando de acordo com a diminuição da sucção (poro pressão negativa) e consequente aumento da porcentagem de água em relação ao volume total de solo. Esse fenômeno acontece até atingir o nível capilar, a partir daí o solo passa a apresentar apenas poro pressão positiva crescente, ficando o teor de umidade volumétrico constante com o aumento da profundidade. Quando o solo se encontra saturado e em equilíbrio, a pressão presente nos poros caracteriza-se maior ou igual à atmosférica, assim quando uma sucção é aplicada, a água é drenada e a pressão nos poros torna-se negativa (JESUS *et al.*, 2015).

A Figura 9 ilustra um perfil de solo em relação ao grau de saturação, no qual geralmente a zona saturada é mais profunda, ocorrendo fluxos com a camada não saturada e com o lençol freático. Já a zona não saturada, que em geral é mais superficial, realiza trocas com a camada saturada e com a atmosfera (BORMA *et al.*, 2015).

Figura 9 – Fluxos entre a interface solo-atmosfera e entre as zonas saturada e não saturada



Fonte: adaptado de Borma *et al.* (2015)

Existem várias teorias para o cálculo da quantidade de água infiltrada, que podem ser representadas por meio de equações empíricas ou de base física. Uma das formas de representação da infiltração em solo não saturado é pela equação de fluxo, que depende da permeabilidade e da curva característica. O movimento da água em um solo não saturado pode ser descrito pela equação de Darcy, originalmente deduzida para solos saturados. Para condições de solos não saturados, deve-se considerar a variação da condutividade hidráulica com o teor de umidade do solo, no qual a condutividade hidráulica do solo saturado é o limite superior desse parâmetro. O potencial da água no solo não saturado na equação de Darcy tem dois componentes, o gravitacional e o matricial. Porém, ainda não se tem um entendimento de qual seria a melhor maneira de expressar a intensidade da chuva com os deslizamentos (GERSCOVICH *et al.*, 2015).

Os pesquisadores Green e Ampt (1911) propuseram uma série de simplificações para solucionar o problema de infiltração de água em superfícies

horizontais, os quais são válidos somente para solos granulares inicialmente secos. Para tanto, os autores consideraram a frente de saturação como bem definida e com sucção matricial constante, independentemente do tempo e da posição. Além disso, consideraram que acima da frente de saturação, a umidade e a condutividade hidráulica do solo são constantes (Green e Ampt, 1911 *apud*. RAWLS *et al.*, 1983). Em 2006, Chen e Young inseriram condições de contorno ao modelo de Green-Ampt, para ser aplicável em superfícies inclinadas. Os autores consideraram que a lâmina d'água está fixa na superfície, que o solo é homogêneo, e a intensidade da chuva constante ou variável. Como resultado, os autores concluíram que a infiltração no solo tende a aumentar com o aumento da inclinação do talude e com a intensidade de chuva (CHEN e YOUNG, 2006).

Gerscovich *et al.* (2015) salientam que depois do término da chuva, os processos de fluxo interno permanecem ocorrendo no solo, o que possibilita que seja deflagrada a ruptura algum tempo após o evento pluviométrico, por efeito da redução da sucção. Wolle (1988) destaca que taludes sob a influência de clima tropical apresentam horizontes de rocha fraturada, sobre a qual se depositam perfis de intemperismo medianamente espessos. A rocha fraturada apresenta permeabilidade superior ao do solo, que causa situações de fluxo preferencial, na qual o nível freático se mantém profundo, e o solo superior fica não saturado por boa parte do tempo, o que pode levar o talude à ruptura (WOLLE, 1988; GERSCOVICH *et al.*, 2015).

Além de aplicação de equações, a infiltração também pode ser estimada por meio da modelagem do fluxo interno de água no solo associado às condições de contorno, como drenagem e precipitação. Kim *et al.* (2004) analisaram a profundidade da frente de umedecimento na estabilidade de taludes através de uma equação proposta para a infiltração em comparação com um modelo numérico (SEEP/W). Os autores confirmaram que a sucção matricial tem grande relevância no estudo de estabilidade de encostas.

Smith *et al.* (2002), a partir de um modelo computacional de fluxo transiente discutem o avanço da frente de umedecimento em uma coluna de solo. De acordo com os autores, a redução inicial na sucção na superfície é rápida, e a condutividade hidráulica aumenta, o que facilita a penetração mais profunda da frente de saturação dentro do solo. Depois disso, se continuar o evento pluviométrico, a pressão neutra superficial tende a diminuir para um limite estabilizado, na qual a condutividade hidráulica e a velocidade de infiltração se igualam. Segundo os autores, se a taxa de

infiltração exceder a condutividade hidráulica saturada, a frente de umedecimento irá causar a destruição completa da sucção em superfície.

2.3.1.4 Influência da vegetação

A influência da vegetação na estabilidade de um talude pode estar vinculada tanto à fatores resistivos quanto à fatores desestabilizantes. Espécies vegetais que apresentam raízes pivotantes podem contribuir para a estabilidade do terreno, através do efeito de ancoragem. Já espécies com raízes superficiais favorecem a instabilização, por causa do processo de infiltração da água e pelo peso próprio acrescido ao terreno. De uma maneira geral, a alteração ou remoção da camada vegetal aumenta o grau de infiltração da água e abre caminho para a erosão das camadas superficiais de solo, expondo camadas mais profundas e frágeis, que apresentam menor coesão e fraca resistência ao cisalhamento (GRAY e LEISER, 1982 *apud*. TABALIPA e FIORI, 2008; JESUS *et al.*, 2015).

Desse modo, a presença de vegetação pode ser favorável por redistribuir a água proveniente da precipitação através das copas das árvores e, conseqüentemente, isso diminui e atrasa a infiltração no solo. A vegetação evita o efeito *splash*, ou seja, evita a erosão direta do solo pela chuva, e minimiza o escoamento superficial. Outro efeito benéfico é o processo de evapotranspiração das plantas, que retira a água do solo, além do acréscimo de resistência causado pelo escoramento de raízes mais profundas (GRAY e LEISER, 1982 *apud*. TABALIPA e FIORI, 2008; JESUS *et al.*, 2015).

Entre os efeitos desfavoráveis da presença de vegetação, podemos citar o efeito alavanca da força do vento nas copas das árvores, que causa uma força cisalhante no terreno. Ocorre também o efeito cunha, que consiste numa pressão lateral causada pelas raízes ao penetrar em fendas, fissuras e canais do solo, além da sobrecarga vertical causada pelo peso próprio das árvores, que tem um efeito agravado em encostas mais íngremes (GRAY e LEISER, 1982 *apud*. TABALIPA e FIORI, 2008; JESUS *et al.*, 2015).

Resumindo, a apresentação desses fatores teve por objetivo expor a complexidade dos processos envolvidos num cenário de instabilidade, sendo difícil determinar uma explicação completa da origem desses acidentes geológicos. O grande número de fatores envolvidos, como características geológicas, pedológicas,

geomorfológicas e hidrológicas, aliadas a influências externas como precipitação e ações antrópicas, tornam a análise intrincada. A variação dos valores críticos que cada um destes aspectos pode assumir, acaba sendo também muito grande, o que torna a previsibilidade de movimentos de massa, uma análise envolta por alto grau de incertezas (MINEROPAR, 2013; LOPES, 2013).

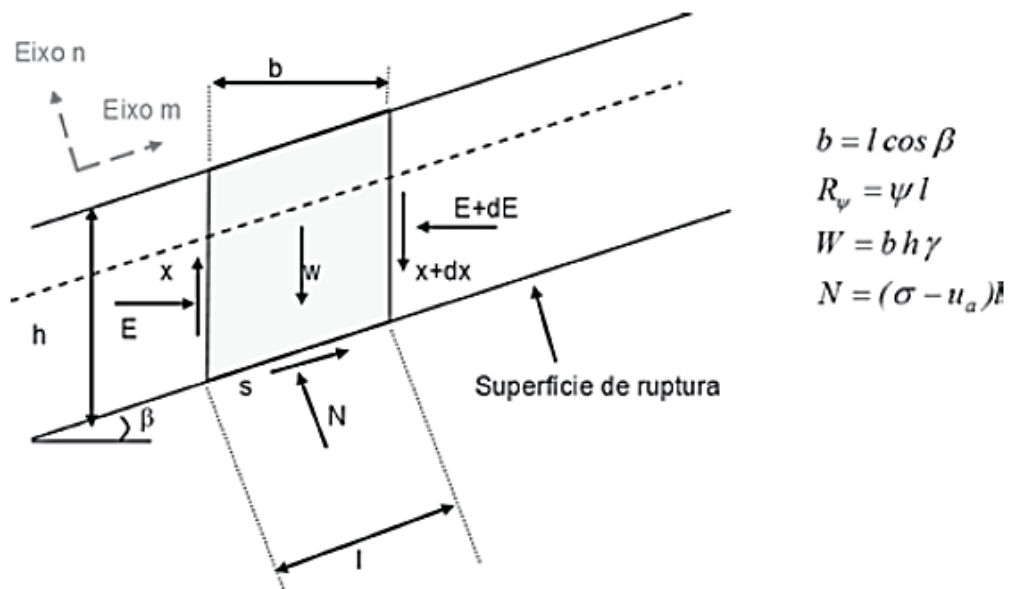
2.3.2 Método de análise de estabilidade por equilíbrio limite

Na análise determinística de estabilidade de taludes, é adotado um fator de segurança (FS), através da comparação das tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento apresentada pela superfície. A Norma ABNT 11682 (2009), que trata da estabilidade de encostas, estabelece valores mínimos que são aceitos para o FS, interpretados como valores admissíveis, e que devem ser maiores que 1,0. Esses valores são determinados de acordo com o tipo e a vida útil da obra, além de levar em consideração os riscos de perda humana e material. Devido à grande variabilidade dos resultados de ensaios geotécnicos, a norma recomenda ainda, que seja majorado em 10% o FS admissível, ou que seja aplicado uma análise probabilística (ABNT 11682, 2009).

Para proceder a análise de estabilidade, existem diversas rotinas numéricas que utilizam, dentre outras coisas, dados como topografia, estratigrafia, peso específico, parâmetros de resistência dos materiais e presença de água, utilizando o conceito de equilíbrio limite. O principal ponto diferente entre os métodos, é a consideração da forma da superfície de ruptura, além da utilização de hipóteses simplificadoras (GERSCOVICH *et al.*, 2015).

Quando o deslizamento é predominantemente translacional e paralelo à superfície do talude, como é o caso da área em estudo, é desprezado os efeitos de extremidades e a análise pode ser feita pelo método de talude infinito. Neste método, os esforços em uma fatia são: o peso, a resultante de esforços normais (N) e a resistência na base da fatia, conforme mostra a Figura 10 (GERSCOVICH *et al.*, 2015).

Figura 10 – Talude infinito: forças atuantes em uma fatia genérica



Fonte: Gerscovich *et al.* (2015)

A partir das considerações apresentadas nesta figura, e independente da dimensão (b) da fatia, é utilizada a expressão (6) para o cálculo do FS:

$$FS = \frac{c' + \gamma h \cos \beta^2 \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} \quad (6)$$

De acordo com Gerscovich *et al.* (2015) é possível utilizar as soluções já conhecidas para cálculo do FS, em solos não saturados, anulando-se a parcela de poro pressão e considerando-se a parcela de sucção mátrica no termo da coesão. Ainda de acordo com os autores, se houver variação da sucção com a profundidade, pode-se dividir a massa em diversas camadas, para incorporar essa variação no parâmetro de coesão. Por fim, os autores afirmam que métodos como os de Sarma (1973), Sarma (1979), Morgenstern e Price (1965) e Janbu (1972) podem ser adotados em análises de solo não saturado, pois envolvem a forma de superfície não circular, além de satisfazerem o equilíbrio de forças e de momentos atuantes.

2.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS

A ocorrência de eventos pluviométricos é considerada como elemento deflagrante e principal responsável por episódios de movimentos de massa, principalmente em países de clima tropical. Essa relação depende da intensidade, duração padrões e os volumes acumulados antecedentes de chuva, caracterizando o tipo de movimento de massa que pode se apresentar. Para o registro das chuvas, o equipamento pluviógrafo é o mais encontrado nas estações meteorológicas, pois possibilita registrar a intensidade de precipitação, por meio da variação da altura de chuva com o tempo. Este aparelho registra, simultaneamente, a quantidade e a duração da precipitação (MONTROYA, 2013).

Com a ocorrência de eventos de precipitação, a instabilização das encostas pode acontecer devido à perda da sucção (e da coesão aparente), pois o avanço da frente de infiltração faz aumentar a umidade do solo, no qual pode ocorrer a ruptura sem que a condição de saturação seja alcançada (MONTROYA, 2013).

A precipitação acontece por um processo aleatório, o qual não pode ser previsto de maneira determinística. Deste modo, para determinar a precipitação pluvial utilizada em análises de estabilidade, deve-se levar em consideração a variabilidade temporal das chuvas intensas, associada a uma determinada probabilidade de ocorrência. Normalmente, quanto mais intensas, mais raras são as chuvas (GONÇALVES, 2011). Portanto, para a caracterização das precipitações faz-se necessário conhecer a sua duração, sua intensidade e sua frequência de ocorrência ou período de recorrência (T_R).

O método da curva IDF (intensidade, duração e frequência de ocorrência) será utilizado na determinação dos cenários de chuva para a análise de estabilidade de taludes, pois se baseia em valores máximos da série amostral. As relações IDF são obtidas de forma confiável a partir da análise estatística de séries históricas de dados pluviográficos (BERTONI e TUCCI, 1993). Em suma, este método permite que se estime a intensidade máxima de uma chuva, para uma determinada duração e certo período de retorno, com base em eventos já ocorridos e que se tenham registros.

Na análise estatística das séries de chuva pode-se usar séries anuais ou de duração parcial, dependendo do tamanho da série e do objetivo do estudo. As séries de duração parcial são utilizadas para registros de séries históricas menores que 12 anos e para tempos de retorno inferiores a 5 anos (WILKEN, 1978 *apud*.

GONÇALVES, 2011). Já a utilização das séries anuais consiste na seleção das maiores precipitações anuais para uma determinada duração. De acordo com a discretização temporal das medidas do aparelho, comumente é escolhido durações de 5, 10, 15, 30 e 60 minutos, bem como durações horárias, como em 1, 2, 4, 6, 12, 18 e 24 horas (GONÇALVES, 2011).

A análise pelo método IDF, consiste primeiramente na seleção das precipitações máximas anuais, para cada período de duração elegido. Após, para cada série de valores máximos ajusta-se uma distribuição teórica de probabilidade, sendo que as distribuições do tipo normal, log-normal, Gumbel e log Pearson tipo III, são as que melhor se ajustam aos processos hidrológicos (LANNA, 1993 *apud*. GONÇALVES, 2011). Isto posto, determina-se a intensidade da precipitação, através da razão entre a precipitação e sua duração (GONÇALVES, 2011). As curvas resultantes representam a relação IDF, que podem ser expressas através da equação (7):

$$I = \frac{a T_R^b}{(t + c)^d} \quad (7)$$

Onde:

T_R = tempo de retorno em anos;

I = intensidade da precipitação em mm.h^{-1} ;

t = duração em minutos;

a , b , c e d = parâmetros ajustados para cada localidade ou estação de medição.

Diversos autores elaboraram curvas IDF na forma da equação (7), de acordo com as características de cada local (TORRICO, 1974; VIEIRA, 1981; PFAFSTETTER, 1982; DENARDIN E FREITAS, 1982; FENDRICH, 1998; SILVA *et al.*, 2002; entre outros). Para o município de Antonina, Fendrich (2003) propôs a seguinte relação IDF - equação (8) - de acordo com séries históricas do local:

$$\frac{5209,55 * T_R^{0,160}}{(t + 57)^{0,978}} \quad (8)$$

A caracterização da precipitação é um parâmetro hidrológico fundamental em análises que envolvem modelagem computacional, principalmente quando se trata de estabilidade de taludes. Para o dimensionamento de um evento pluviométrico, é necessário conhecer a relação IDF para poder, por exemplo, combinar períodos prolongados de chuva com eventos extremos, ou analisar a intensidade de um evento de chuva em relação à precipitação média anual na mesma região (GONÇALVES, 2011; MINEROPAR, 2013).

3 ÁREA DE ESTUDO

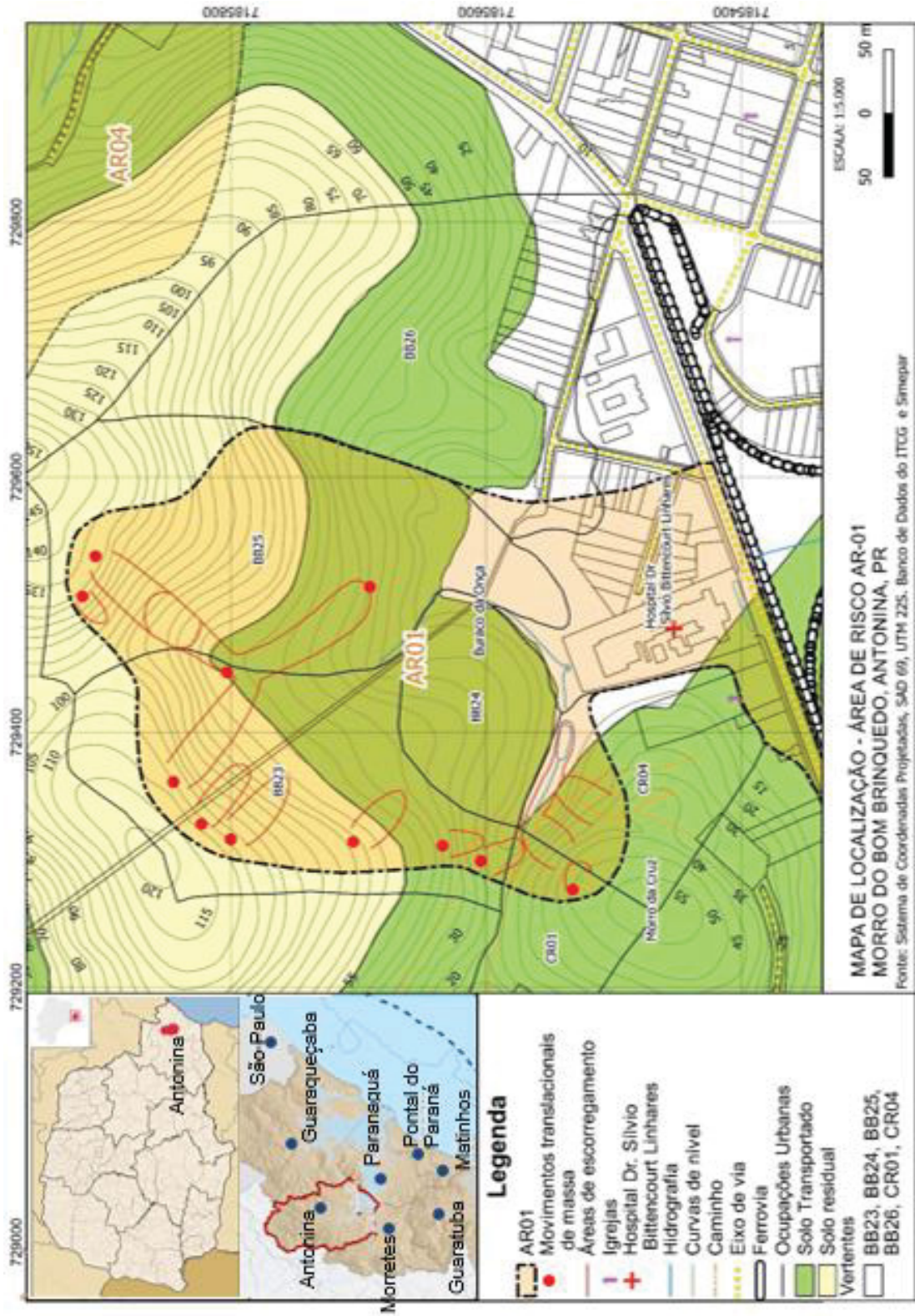
A área de estudo está localizada na vertente sul do Morro do Bom Brinquedo, no município de Antonina, Paraná. Antonina está localizada no litoral norte do Estado do Paraná, na Mesorregião Metropolitana de Curitiba, na Microrregião de Paranaguá. O município limita-se ao norte e a oeste com Campina Grande do Sul, ao sul e a oeste com Morretes, e a leste com Paranaguá e Guaraqueçaba. Está a uma distância de 84 km via BR-277 e 79 km via Estrada da Graciosa, da capital do estado, Curitiba. O município está localizado entre a Baixada Paranaense e a Serra do Mar, com relevo predominantemente montanhoso, com planícies ao centro e ao sul, além de alguns morros espalhados pelo município (PREFEITURA MUNICIPAL DE ANTONINA, 2019).

O local de estudo corresponde à área de risco AR-01 (Figura 11), sendo esta terminologia adotada por Mineropar (2013), a qual realizou um estudo da predisposição do terreno para movimentos de massa na área urbana do município de Antonina. Esta área está localizada no lugar denominado Buraco da Onça, no Morro do Bom Brinquedo, e situa-se sobre as ruas Thiago Peixoto, Isidoro Costa Pinto, 5 de Junho e Nestor de Castro, Antonina, Paraná.

A área de risco estudada tem aproximadamente 80.000 m², e ocupa mais extensamente as vertentes BB23, BB24 e BB25, com contribuições parciais das vertentes BB26, CR01 e CR04 (Figura 11). A planície de dispersão de água e sedimentos tem aproximadamente 20.000 m² (MINEROPAR, 2013). De acordo com Mineropar (2013) a área foi classificada com um nível de risco muito alto para enxurradas e alagamentos, devido à grande extensão da bacia de contribuição, capaz de concentrar grandes volumes de água em períodos de chuva intensa e pela proximidade da ocupação urbana da planície de dispersão.

A área apresenta ocupação residencial mais densa na base da vertente CR-04 e na planície de dispersão, no polígono delimitado pelas ruas Thiago Peixoto e Nestor de Castro. Nas vertentes BB23, BB25 e BB24 há ocupação residencial incipiente na base (MINEROPAR, 2013).

Figura 11 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: O autor

De acordo com dados da COMDEC do município (Coordenadoria Municipal de Defesa Civil), cerca de 70 residências podem ser afetadas caso a massa de solo venha a deslizar nas proximidades da área em questão. Dentre elas, quase todas as edificações situam-se na planície de dispersão de água e sedimentos da bacia hidrográfica, podendo-se destacar a presença de uma igreja, além do Hospital Dr. Silvio Bittencourt Linhares.

A maioria das vertentes da área considerada apresentam alta predisposição para movimentos de massa, devido à presença de quebras de relevo e afloramentos rochosos, deslizamentos planares, sulcos de erosão, abundantes matacões na encosta superior, com surgências de água e sumidouros na encosta inferior, etc., (MINEROPAR, 2013) sendo algumas destas características apresentadas na Figura 12. Já o nível de risco para movimentos de massa, de acordo com Mineropar (2013), é considerado moderado devido à localização das moradias na base da encosta, em terreno elevado e fora do alcance de detritos.

Em relação à cobertura vegetal do local, trata-se de mata secundária de médio a grande porte na meia encosta superior e topo do relevo. Na meia encosta inferior, a mata secundária apresenta pequeno a médio porte, além de pouco densa. Já na base da encosta considerada e na planície de dispersão, o meio encontra-se desmatado, contando com algumas árvores isoladas. A mata secundária na base do morro é rala e de menor porte devido ao desmatamento que se repete periodicamente, seja para construção de novas moradias ou para aproveitamento de madeira (MINEROPAR, 2013).

O clima da região da Serra do Mar é temperado chuvoso, úmido em todas as estações, com temperatura média anual entre 19 e 21° C na planície costeira (VANHONI e MENDONÇA, 2008). De acordo com Kim *et al.* (2000), as amplitudes térmicas diárias na região litorânea são as menores do estado, devido principalmente à proximidade da massa de água do Oceano. Porém, de acordo com dados do Simepar, a cidade de Antonina registra valores altos de temperatura, principalmente no verão, com valores acima de 33° C e sensação térmica geralmente superior, devido à umidade do ar.

Figura 12 – Fotos do local de estudo



Fonte: O autor

No complexo da Serra do Mar o clima é do tipo tropical muito úmido, e não apresenta estação seca. O máximo registro de pluviosidade na planície litorânea observa-se nos meses de verão, quando há a atuação maior no sistema da Massa

Tropical Atlântica. A precipitação média anual da planície de Antonina varia entre 2.000 e 2.200 mm, sendo que cerca de 800 mm são registrados no verão, quando comumente acontecem precipitações iguais ou superiores a 50 mm/24 h. A maior média de dias chuvosos é entre os meses de dezembro a março, com 18 a 20 dias de chuva por mês. Por fim, o mês de junho apresenta a menor média de chuva (11 dias), além de contar com raros registros de precipitações da ordem de 50 mm/24 h (VANHONI e MENDONÇA, 2008).

A presença da Serra do Mar, com altitude média variando entre 800 a 1.200 metros, representa a principal contribuição para a concentração de vapor de água nos baixos e médios níveis de pressão atmosférica na região litorânea. Isto também possibilita que ocorram precipitações mais persistentes na região da área estudada, com um volume anual maior do que nos demais locais (KIM et al., 2000).

Em relação à drenagem do morro em estudo, há a presença de fundos de vale secos do topo até a meia encosta inferior, onde ocorrem surgências e água corrente. No fundo do vale da área estudada, entre as vertentes BB-23 e CR-04, há a presença de tanques e banhado permanente, caracterizando-se como locais de concentração de água superficial. De acordo com Mineropar (2013), na base da vertente BB-23 as margens de um pequeno córrego estão solapadas por erosão e na planície de dispersão de sedimentos o canal de drenagem comporta fluxos de água torrenciais.

Mineropar (2013) afirma que a geometria vertical típica de uma vertente no Morro do Bom Brinquedo apresenta no topo e na meia-encosta superior uma declividade que aumenta gradualmente de cima para baixo. Em alguns pontos, a meia-encosta superior assume o aspecto de escarpa rochosa, devido à presença de alguma descontinuidade geológica ou à remoção mais intensa do material inconsolidado. A meia-encosta inferior costuma apresentar perfil vertical côncavo, com a declividade tendendo a se horizontalizar no sopé da encosta, apresentando deposição dos materiais erodidos com a granulação diminuindo para baixo, devido à abrasão e à seleção hidráulica. As características geomorfológicas do Morro Bom Brinquedo levantadas por Mineropar (2013) para a área em estudo deste trabalho, estão sintetizadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características geomorfológicas do local de estudo

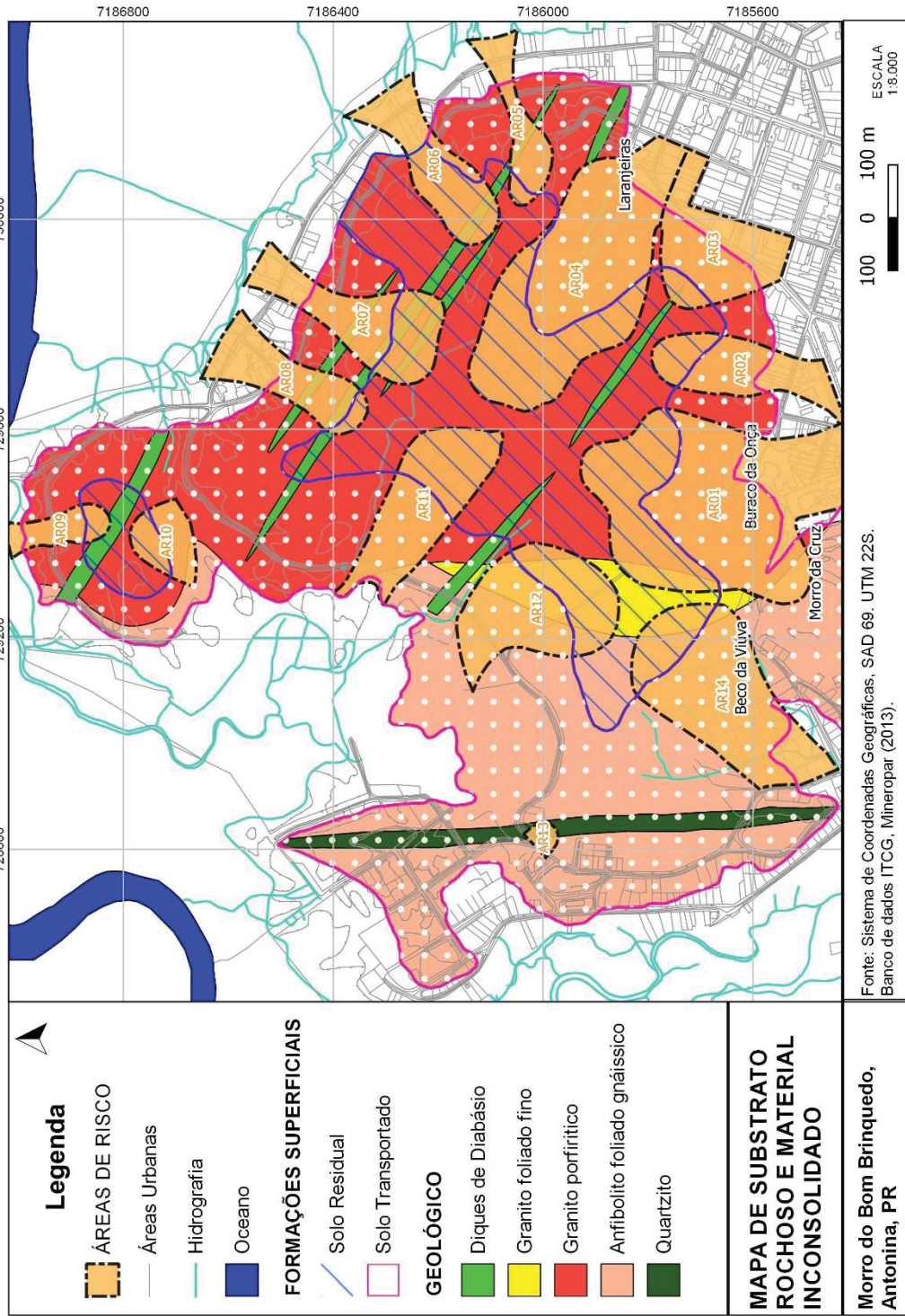
Vertente	Declividade média (°)	Amplitude (m)	Observações
BB23	38°	112,0	Alta instabilidade, com um deslizamento planar, matacões, surgências de água e solapamento de drenagem na base. Forma uma sela entre os Morros do Bom Brinquedo e da Cruz.
BB24	16°	35,0	Área moderada de instabilidade, com dois deslizamentos planares recentes. Acúmulo de água na base.
BB25	42°	130,0	Alta instabilidade definida pela presença de deslizamentos planares, sulcos de erosão, abundantes matacões na encosta superior, com surgências de água e sumidouros na encosta inferior. Várias quebras de relevo. Acúmulo de água na base.
CR01	26°	30,0	Alta instabilidade, com um total de 5 deslizamentos planares sobre solo transportado (colúvio fino e grosso) de anfibolito foliado.
CR04	20°		

Fonte: Mineropar (2013)

3.1 SUBSTRATO ROCHOSO E MATERIAL INCONSOLIDADO

A Figura 13 apresenta o substrato rochoso e material inconsolidado de todo o Morro do Bom Brinquedo, em Antonina. Em relação à geologia da área de estudo (AR01), predomina-se o granito porfirítico, grosso e isótropo, com pequenas áreas de contribuição do anfibolito foliado e granito foliado. O granito aflora em campos de matacões localmente de grande porte (maior que 3 metros de diâmetro), lajedos e escarpas verticais, principalmente nas encostas superiores e topos de relevo (MINEROPAR, 2013). De acordo com Marchi e Picanço (2012), as fraturas de rocha herdadas pelo saprólito do granito podem ter sido determinantes como pontos de fraqueza do talude, induzindo a nucleação de fissuras e iniciando os deslizamentos translacionais que ocorreram no Morro do Bom Brinquedo.

Figura 13 – Mapa do substrato rochoso, material inconsolidado e de localização das demais áreas de risco no Morro do Bom Brinquedo



Fonte: O autor

As seções de solo típicas do Morro do Bom Brinquedo seguem certo padrão, com solo residual no topo e na meia encosta superior das vertentes, com pouca variação de espessura ao longo da declividade, mas com redução de espessura no sentido da base, onde existe variação perceptível. Na meia encosta inferior e base das vertentes está presente o solo transportado, ou as rampas de colúvio, tipicamente instáveis, porque são sustentados pela matriz predominantemente argilosa, com espessura aumentando no sentido da base (MINEROPAR, 2013). De acordo com Lopes (2013), a espessura média do solo na meia encosta no Morro do Bom Brinquedo até alcançar a rocha ou horizonte com sinais de rocha alterada, foi de 5 metros.

Segundo Mineropar (2013), no Morro do Bom Brinquedo a passagem de solo residual para transportado, ao longo da declividade, ocorre em torno da cota de 60 m. As passagens entre as camadas de solo apresentam um caráter gradual e difuso em toda a área mapeada, com exceções dos locais onde o colúvio repousa sobre saprólito ou rocha alterada. Ainda segundo os autores, depósitos arenosos, argilosos e pedregosos ocorrem na planície de dispersão de água e sedimentos, constituindo um leque aluvial na desembocadura do vale do Buraco da Onça.

Mineropar (2013) realizou ensaios de caracterização em todo o morro de estudo. Na Tabela 6 estão apresentados os pontos de amostragem, denominados AM, correspondentes ou próximos à área de interesse desta pesquisa. De modo geral, as amostras apresentaram altos índices de erodibilidade, justificando atenção especial às suas respectivas vertentes como locais de alta suscetibilidade a deslizamentos planares, em períodos de chuva prolongada (MINEROPAR, 2013).

O perfil residual no morro do Bom Brinquedo apresenta tipicamente uma camada de solo maduro, argiloso, compacto, de cor marrom a amarelo-escuro. Esta camada tem passagem gradual ou difusa à camada de solo jovem silto-arenoso, compacto, de cor rosada ou vermelho-clara, com espessura equivalente à do solo maduro. As amostras de solo residual foram classificadas granulometricamente com cerca de 62,3% de argila, 19,7% de silte e 18,0% de areia, com índice de vazios médio de 1,23 e porosidade de 54,9. Quanto aos índices físicos de campo, a massa específica ensaiada foi cerca de 2,854, e o grau de saturação ficou na média de 79,9% (MINEROPAR, 2013).

Tabela 6 – Dados de caracterização pretéritos

Amostra		Granulometria			Classe textual	Índices físicos				Erodibilidade			
		Ag	Si	Ar		δs	δdc	e	n	S	Ad	P	Er
AM 010	CA	27	63	10	Franco Argiloso-Siltoso	2,818	0,99	1,85	64,9	46,8	0,21	51,87	0,17
AM 011A	SL	69	17	14	Muito Argiloso	2,925	1,28	1,27	56,2	88,0	0,11	18,10	0,25
AM 011B	SG	49	23	28	Argila	2,781	1,34	1,08	51,9	79,3	0,19	26,39	0,29
AM 012A	CG	56	21	23	Argila	2,724	1,27	1,15	53,5	74,5	0,08	17,98	0,18
AM 012B	CG	46	29	25	Argila	2,730	1,39	0,96	49,0	84,3	0,12	16,02	0,30
AM 012C	SG	24	44	32	Franco argiloso	2,707	1,42	0,91	47,6	60,5	0,21	35,48	0,21
AM 013A	SL	69	15	16	Muito argiloso	2,880	1,18	1,43	58,9	78,3	0,17	3,24	2,10
AM 013B	SS	49	27	24	Argiloso	2,756	1,38	0,99	49,8	73,5	0,22	73,54	0,12
AM 014A	CG	61	19	20	Muito argiloso	2,789	1,32	1,12	52,7	81,2	0,05	9,13	0,22
AM 014B	CG	68	15	17	Muito argiloso	2,775	1,32	1,11	52,6	94,4	0,12	87,60	0,10

CA colúvio de anfíbolito; SL solo laterítico; SG saprólito de granito; CG colúvio de granito; SS solo saprolítico
 Ag Argila; Si Silte; Ar areia; δs massa específica de sólidos; δdc massa específica seca de campo; e índice de vazios; n porosidade; S grau de saturação; Ad índice de adsorção; P perda de massa por imersão; Er erodibilidade.

Fonte: adaptado de Mineropar (2013)

O saprólito de granito porfírico no Morro do Bom Brinquedo caracteriza-se pela coloração creme-amarelada, devido à infiltração de óxidos e hidróxidos de ferro a partir do solo maduro, ou a cor pode ser também o produto intermediário do processo de laterização. Além da coloração característica, o saprólito granítico aflora nos cortes e barrancos naturais de fundo de vale como um material argilo-siltoso, de textura grossa e maciça, friável e poroso. A espessura desta camada sobre o granito varia bastante, de poucos centímetros até vários metros. As amostras coletadas em saprólito de granito foram classificadas com uma média de 36,5% de argila, 30,0% de areia e 33,5% de silte. No que diz respeito aos índices físicos de campo, a variação da massa específica de sólidos apresentou índice de cerca de 2,744, índice de vazios médio de 1,0, porosidade de 49,8 e grau de saturação de cerca de 69,9% (MINEROPAR, 2013).

No Morro do Bom Brinquedo, as rampas de colúvio estendem-se aproximadamente da cota 60 m até a base das vertentes. As amostras de colúvio de granito coletadas no morro apresentaram grande porcentagem de material argiloso.

Os teores de argila deste conjunto de amostras variaram de 46 a 68%, os teores de silte de 15 a 29% e os teores de areia de 17 a 25%. O índice de vazios apresentou valores de 0,96 a 1,15, a porosidade ficou entre 49,0 e 53,5, e o grau de saturação variou no intervalo de 74,5 a 94,4% (MINEROPAR, 2013).

3.2 EVENTOS DE DESLIZAMENTOS DE MASSA

Os movimentos gravitacionais de massa (MGM's), ocorridos no perímetro urbano de Antonina em março de 2011 (Figura 11), foram gerados por chuvas intensas e concentradas em poucas horas, da ordem de 400 mm/24h, após um período de chuvas continuadas superior a 30 dias (MINEROPAR, 2013). De acordo com Mineropar (2013), foram cadastrados 115 movimentos de massa, dos quais 3 foram classificados como rotacionais (2,6%), 81 como translacionais (70,4%) e 22 como mistos (19,1%). Os fluxos de lama e detritos ocorridos (6,1%) são produtos da evolução natural do deslizamento planar, e resultam da progressiva incorporação de água ao material em movimento, nas encostas inferiores e bases de vertentes (MINEROPAR, 2013). A Figura 14 ilustra os deslizamentos ocorridos no Morro do Bom Brinquedo.

Figura 14 – Deslizamento de Massa no Morro do Bom Brinquedo



Fonte: Arquivos de COMDEC (2011)

De acordo com levantamento realizado por Mineropar (2013), no local ocorreram dois deslizamentos planares de grande extensão (maior que 100 metros) e

pequeno volume (menor que 5.000 m³) nas encostas superiores das vertentes. Ainda segundo o autor, oito deslizamentos planares de pequena extensão (menor que 50 metros) e pequeno volume (menor que 1.000 m³) distribuem-se nas demais vertentes. Já no fundo do vale, formou-se um depósito de detritos areno-argilosos em consequência de cinco pequenos deslizamentos planares ocorridos nesta época. Aos movimentos de massa recentes associam-se feições de deslizamentos antigos e recentes, principalmente trincas e degraus de abatimento. Mineropar (2013) conclui que a maior incidência de eventos no Morro do Bom Brinquedo pode ser explicada pela maior transmissividade hidráulica e menor espessura do solo arenoso, de origem granítica.

De acordo com arquivos da Defesa Civil (COMDEC), ocorreram outros movimentos gravitacionais de massa após o ano de 2011, tendo registro de eventos também em 2015 e 2017. Portanto, para promover a prevenção de desastres naturais de áreas de risco, devem ser realizados, permanentemente, pesquisas relacionadas à estabilidade da área. De uma maneira geral, sabe-se que nas vertentes mais afetadas por movimentos de massa recorrentes, o terreno apresenta-se ondulado, trincado e com feições erosivas mais abundantes. Estas características aumentam a probabilidade de reativação de deslizamentos antigos, além do desenvolvimento de novos, pela maior facilidade de acúmulo de água da chuva nas rugosidades do terreno e de infiltração nas trincas e locais mais permeáveis (MINEROPAR, 2013).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A dinâmica da pesquisa foi dividida em três macro etapas, conforme mostra o fluxograma geral de atividades na Figura 15. A etapa I compreendeu o levantamento dos dados do meio físico, seja por ensaios de campo, laboratório e/ou consulta em referências bibliográficas. A etapa II consistiu no tratamento dos dados colhidos, através do refinamento, seleção e comparação (validação) das informações, para a definição de diversos cenários que contemplem a variabilidade dos fatores de entrada, e que alimentam a modelagem numérica. Por fim, a etapa III engloba as simulações de fluxo e de estabilidade de taludes do local de estudo, que foram realizadas com os aplicativos SEEP/W e SLOPE/W utilizando a licença “30 Day Trial” do programa GeoStudio.

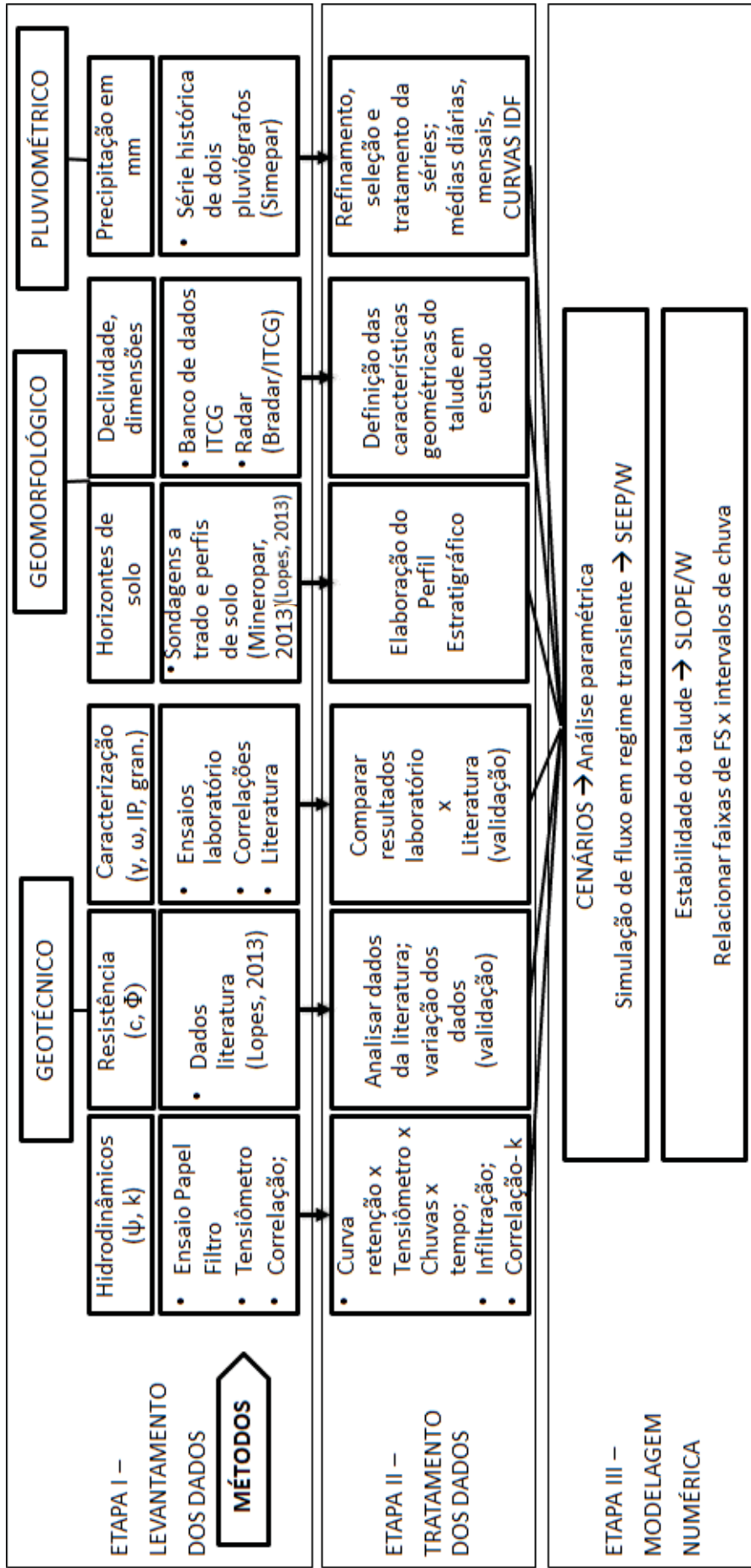
As modelagens foram aplicadas e validadas em dois perfis representativos do talude na vertente sul do Morro do Bom Brinquedo, no município de Antonina, PR. Desta maneira, a análise hidromecânica tem aplicabilidade de acordo com as premissas e condições de contorno adotadas, que levam em consideração a correlação entre os dados obtidos e os dados de séries históricas da área estudada.

4.1 LEVANTAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS

As etapas I e II têm fator essencial para a calibração dos parâmetros e cenários utilizados na análise integrada e modelagem numérica, pois busca-se estabelecer os valores referenciais que regem o comportamento do solo, os quais alimentam o modelo computacional. A definição, comparação e entendimento dos parâmetros de projeto para a análise de estabilidade de taludes é fundamental, e a quantidade amostral dos dados deve traduzir o comportamento do talude como um todo. Porém, essa etapa acarreta grandes desafios na engenharia geotécnica, devido ao alto grau de incertezas inerentes, tanto em relação aos métodos de coleta de dados, quanto à própria variabilidade dos parâmetros presente nas encostas naturais.

Para a obtenção dos parâmetros que caracterizam o problema em questão, estes foram subdivididos em três categorias: geotécnicos, geomorfológicos e pluviométricos. Os dados foram levantados a partir de coletas e ensaios de campo, ensaios de laboratório e/ou referências bibliográficas, sendo alguns dados pretéritos a este estudo, como será explanado nos subitens a seguir.

Figura 15 – Fluxograma geral da pesquisa



Fonte: O autor

4.1.1 Dados Geotécnicos

Foi realizado a coleta de amostras deformadas e indeformadas no local de estudo, para realização dos ensaios de caracterização e sucção e posterior determinação, por correlação, dos índices físicos e da condutividade hidráulica. Para os parâmetros de resistência e condutividade hidráulica foram utilizados dados bibliográficos.

Para a determinação da sucção matricial, foi realizado em laboratório o ensaio do Papel Filtro em amostras indeformadas, para posterior determinação da curva de retenção de água no solo. Os dados de sucção foram complementados através de leituras realizadas em 4 tensiômetros instalados na área de estudo. A série de dados de tensão matricial *in loco* pertencem ao arquivo do ITCG, antiga Mineropar, que nos anos de 2012 e 2013 instalou e realizou as leituras de 4 tensiômetros no local.

4.1.1.1 Campanha de coleta de dados

A campanha de coleta de dados consistiu na amostragem de solo em 5 pontos distintos da vertente sul do Morro do Bom Brinquedo. Foram coletadas amostras deformadas para os ensaios de caracterização, e amostras indeformadas para a realização do ensaio de sucção e peso específico natural.

Para a coleta das amostras, primeiramente foi feita a limpeza dos locais, retirando a camada de vegetação e, em seguida, abriu-se um poço até a profundidade aproximada de 1 metro. Para cada local, foram retirados aproximadamente 20 kg de solo deformado para os ensaios de caracterização. No procedimento de coleta das amostras indeformadas (Figura 16), foram retirados, de cada um dos 5 locais, 10 cilindros de PVC de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, visto a impossibilidade da retirada de grandes blocos indeformados devido à grande declividade do talude, e também por não ser acessível por veículos. Tomou-se o cuidado de evitar esforços na cravação dos cilindros, para a amostra não romper por cisalhamento, portanto, à medida que se cravou o cilindro, foi talhado o solo até que o topo da amostra extravasasse a cota do topo do cilindro. Cada amostra foi envolvida por plástico filme, atadura gessada e plástico bolha, a fim de manter a sua integridade, sendo transportadas até o laboratório dentro de uma caixa de isopor hermeticamente fechada.

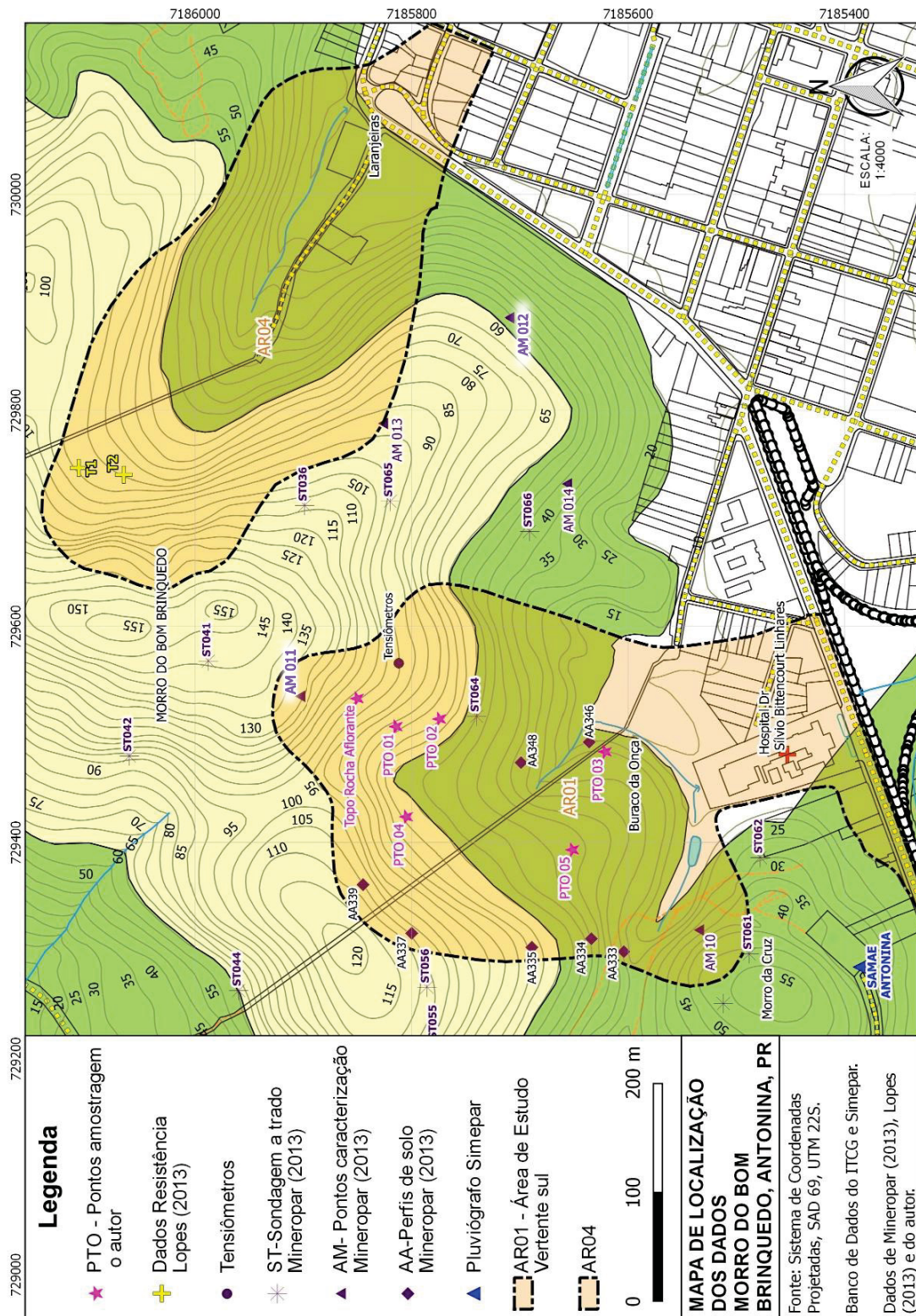
Figura 16 – Procedimento de coleta de amostras indeformadas



Fonte: O Autor

Os pontos de coleta foram selecionados a partir da análise dos dados descritos por Mineropar (2013), buscando-se coletar amostras dos diferentes tipos de solos ao longo da vertente em estudo, com base no mapa de substrato rochoso e material inconsolidado. A Tabela 7 apresenta as coordenadas, cota altimétrica e profundidade de coleta de cada uma das amostras, e a localização espacial dos pontos de coleta pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 – Mapa de localização dos dados



Fonte: O autor

Tabela 7 – Localização dos pontos de amostragem

Ponto	Data da amostragem	Cota (m)	Coordenadas (*)	Profundidade de coleta (m)	Classificação do solo (**)
01	01/07/2018	90	729.507 E 7.185.814 N	0,50	Residual de granito
02	17/07/2018	75	729.514 E 7.185.774 N	0,70	Residual de granito
03	08/09/2018	25	729.484 E 7.185.621 N	0,70	Solo transportado Coluvionar
04	27/09/2018	65	729.424 E 7.185.805 N	0,90	Residual de granito
05	27/09/2018	43	729.393 E 7.185.651 N	1,00	Solo transportado Coluvionar

(*) Coordenadas em UTM com *datum* WGS84, Fuso 22 S.

(**) De acordo com Mineropar (2013).

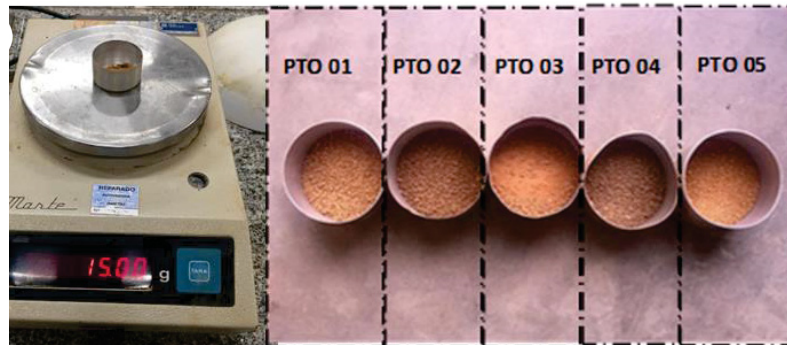
Fonte: O autor

4.1.1.2 Ensaios de Caracterização

Os índices físicos dos solos são grandezas que relacionam os pesos e/ou volumes das partes sólidas e dos vazios presentes no solo, a partir da umidade, peso específico natural e densidade real do solo. Desta maneira, os ensaios de laboratório foram realizados para a determinação do teor de umidade natural, densidade real do solo, granulometria e determinação dos índices de consistência (limite de liquidez e limite de plasticidade). Os ensaios foram feitos no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME), no Campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná.

O teor de umidade dos solos foi determinado com base nos procedimentos apresentados no anexo da NBR 6457 (2016). Foram realizadas de três a cinco determinações do teor de umidade por amostra, a fim de se obter a média das determinações (Figura 18). O peso específico natural do solo foi determinado a partir das amostras indeformadas moldadas para o ensaio de sucção.

Figura 18 – Determinação do teor de umidade



Fonte: O autor

A densidade real do solo foi determinada através dos procedimentos da norma DNER-ME 093 (1994), o qual foi realizado, no mínimo, duas vezes por ponto amostrado. A diferença entre as duas determinações não foi maior que 0,009, e o resultado considerado foi a média obtida entre estes valores (Figura 19).

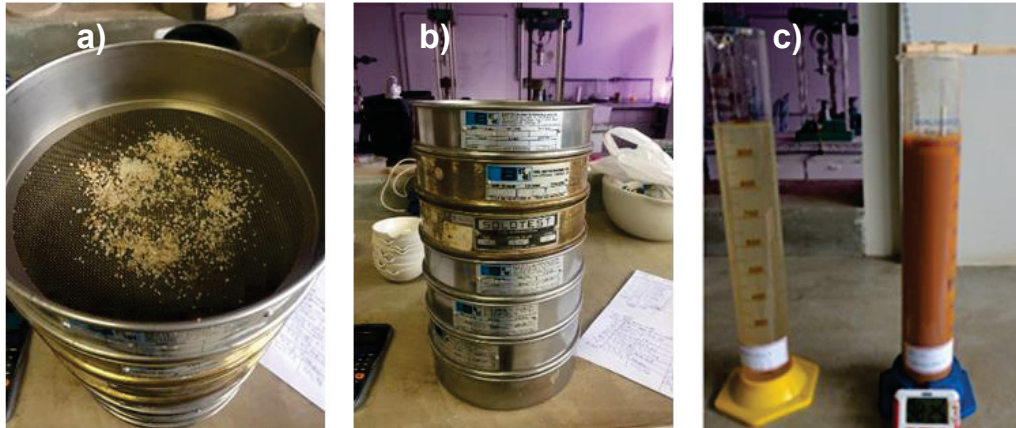
Figura 19 – Determinação da densidade real do solo



Fonte: O autor

Para a análise granulométrica, foi utilizada a NBR 7181 (1984), na qual a fração grossa do solo foi levantada pelo método do peneiramento, enquanto que para a fração fina foi usada a técnica da sedimentação (Figura 20). Dessa forma, encontra-se o percentual de grãos de cada tipo de solo de acordo com a faixa de tamanho de grãos adotada na NBR 6502 (1995).

Figura 20 – Análise Granulométrica, peneiramento fino (a) peneiramento grosso (b) e sedimentação (c)



Fonte: O autor

A determinação da plasticidade diz respeito ao comportamento da fração fina do solo, sendo determinada através dos limites de consistência. Em relação aos procedimentos do ensaio, para o limite de plasticidade foi utilizada a NBR 7180 (2016) (Figura 21), enquanto que para o limite de liquidez seguiu-se os preceitos da NBR 6459 (2016), como ilustrado na Figura 22. Deste modo, o índice de plasticidade do solo foi determinado a partir da diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade encontrados para cada amostra.

Figura 21 – Ensaio de determinação do Limite de Plasticidade



Fonte: O Autor

Figura 22 – Ensaio de determinação do Limite de Liquidez



Fonte: O autor

Para complementar e validar os valores que foram encontrados através dos ensaios, estes foram comparados com os dados de Mineropar (2013). Mineropar (2013) realizou ensaios de caracterização em todo o morro de estudo, sendo que na Figura 17 estão alocados os pontos de amostragem, denominados AM, para a área de interesse desta pesquisa.

4.1.1.3 Ensaio do Papel Filtro

Para o desenvolvimento do modelo proposto, o ensaio de sucção por meio do papel filtro é um dos elementos principais da pesquisa. Os parâmetros obtidos com esse ensaio se correlacionam com a análise de infiltração da água da chuva para as camadas com solos não saturados, impactando diretamente no entendimento dos cenários de sucção frente às variações do teor de umidade, pois interfere diretamente no processo de percolação da água ao longo do talude.

A determinação da curva de retenção de água no solo foi realizada através da técnica do papel filtro. Os materiais necessários para a realização do ensaio foram:

papel filtro Whatman N° 42, água desaerada, filme plástico de PVC, filme alumínio; cilindro amostrador metálico, pinças, tesoura, luvas de látex, fita adesiva plástica, sacos herméticos auto selantes, caixa de isopor hermética, balança analítica de 0,0001 gramas de precisão com câmara de pesagem, câmara seca e estufa.

A amostragem para o ensaio pode ser realizada de duas maneiras: por meio da variação dos teores de umidade, utilizando uma mesma amostra indeformada, ou coletando diversas amostras indeformadas do mesmo local, sendo que para cada uma delas são aplicados valores de umidades diferentes. Neste estudo foi utilizado a segunda técnica, devido à problemas de controle da umidade quando utilizado uma única amostra, além da possibilidade de perda de material no manuseio e no processo de secagem e umedecimento. Ademais, o uso de várias amostras ocasiona um tempo total de ensaio menor, já que o equilíbrio pode ser atingido concomitantemente pelas diversas amostras com diferentes umidades. Por fim, as amostras foram submetidas à variação de umidade por processos de secagem e umedecimento, sendo os resultados apresentados separadamente por causa do fenômeno da histerese.

Para determinar o intervalo de imposição de umidade, colocou-se uma amostra de cada ponto para saturação, por cerca de um dia, e dessa forma aferir um ponto de sucção aproximadamente nula. Da mesma maneira, foi secada uma amostra de cada ponto até a umidade higroscópica, a fim de determinar um ponto de sucção próxima da máxima. Tão logo determinado os limites superior e inferior de variação da umidade, foram divididas as 10 amostras de cada ponto em intervalos iguais de umidade, de forma a garantir uma boa distribuição de pontos com diferentes níveis de sucção e com isso uma maior representatividade da curva.

O primeiro passo do procedimento de ensaio foi a moldagem das amostras indeformadas retiradas do campo, em um anel metálico circular, de diâmetro aproximado de 4,8 cm e altura de 2 cm, de acordo com a Figura 23. De cada cilindro de PVC amostrado em campo, foi possível moldar um corpo de prova em anel metálico circular para o ensaio de sucção. No campo, foram colhidos 10 cilindros de PVC para cada um dos 5 pontos amostrados, e o ensaio foi repetido 3 vezes para cada ponto, com duas medidas de umidade, totalizando 300 pares de sucção *versus* umidade determinados para a área em estudo. No procedimento de moldagem, cuidou-se para que o solo ocupasse todo o volume do anel metálico, pois a umidade volumétrica foi determinada considerando este volume.

Figura 23 – Moldagem dos cilindros metálicos para sucção



Fonte: O autor

Para a medição da sucção matricial, foram colocados dois pedaços de papel filtro Whatman N° 42 diretamente sobre a superfície da amostra, para que os papéis entrassem em contato com a água dos poros do solo, sendo o fluxo apenas devido a fenômenos capilares. Os papéis utilizados eram quadrados com lado de 1 cm cada, de modo a garantir o contato da área total do papel com a superfície do solo e maximizar a precisão das medições de umidade do papel. Após o estabelecimento do grau de umidade desejado no solo amostrado, colocou-se os dois papéis sobre a amostra, estando devidamente pesados e secos em estufa. A selagem dos conjuntos de solo e papel filtro foram feitas embrulhando-os em filme de PVC, seguidos de filme de alumínio, de modo a se evitar perda ou ganho de umidade para o meio externo, sendo feitas duas camadas de cada, intercaladas. Por último, o conjunto foi protegido com filme plástico de PVC para manter o papel firme contra o solo. As amostras foram armazenadas em uma caixa de isopor hermeticamente fechada e colocadas em câmara seca (aproximadamente 19°C) por 7 dias, para obter o equilíbrio do conjunto, e posterior medição da sucção matricial do solo. Os procedimentos descritos neste parágrafo estão sintetizados na Figura 24.

Após o fim do período de equilíbrio, pesou-se o papel filtro e a amostra de solo com o anel, em uma balança com resolução de 0,0001 gramas. A remoção do papel filtro foi feita com pinça o mais rápido possível (menos de 5 segundos) e transferidos para um plástico hermeticamente fechado para então se proceder a determinação da massa do papel úmido. Após a determinação da massa, o papel é colocado na estufa para secagem durante 24 horas (aproximadamente 105°C). A retirada do papel da estufa também foi rápida e com o uso de pinça, sendo o papel acondicionado em saco

plástico hermético, com a sua respectiva tara previamente determinada, para a determinação de sua massa. As amostras de solo também foram pesadas e medidas após a retirada do papel, para a determinação do peso específico seco e possível correção das umidades estimadas no início do ensaio.

Figura 24 – Preparação das amostras para o período de equilíbrio da sucção



Fonte: O autor

A determinação do ponto de umidade final do ensaio do papel filtro depende do uso que se dá à curva de retenção de água no solo. Marinho *et al.* (2015) sugerem que a amostra seja secada ao ar por alguns dias (umidade relativa do ar), para a determinação de um ponto da curva de retenção de água no solo com sucção elevada, que colabora na definição final da curva. Após a determinação do teor de umidade de equilíbrio do papel e do solo, utilizou-se a equação de calibração (Tabela 4) para se obter a sucção (MARINHO *et al.*, 2015).

De posse da curva de umidade volumétrica *versus* sucção, em um primeiro momento foram utilizadas as equações propostas por Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994), presentes na Tabela 2 (MARINHO *et al.*, 2015), para interpolar os pontos experimentais e determinar a curva de retenção de água de cada solo. Utilizou-se inclusive o software RETC (VAN GENUCHTEN, *et al.*; 1991), versão 6.02 para o ajuste das curvas, porém não foi possível fazer um ajuste satisfatório, visto que

estas relações matemáticas são para curvas uni-modais. Portanto, como o solo apresentou influência dos macroporos e microporos, utilizou-se o programa LABFIT, desenvolvido na Universidade Federal de Campina Grande (Paraíba – Brasil), para o ajuste de curva. De acordo com Silva *et al.* (2004), no LABFIT os ajustes das funções são realizados por meio de regressão não-linear aplicada de forma iterativa, até que se atinja um critério de convergência dos pontos.

Para tanto, foi necessário encontrar equações que apresentassem um melhor ajuste aos diferentes patamares formados pelos pontos experimentais, para a adequada representação da curva de retenção de água no solo de cada amostra. Do mesmo modo que FERREIRA (2017), as equações foram ajustadas através da formulação genérica denominada “Harris + C”, conforme Equação (9):

$$Y = \frac{1}{(A + B * X^C)} + D \quad (9)$$

Onde:

A, B, C e D= parâmetros de ajuste da curva;

Y= sucção estimada (kPa);

X= umidade volumétrica (m³/m³).

4.1.1.4 Tensiômetro

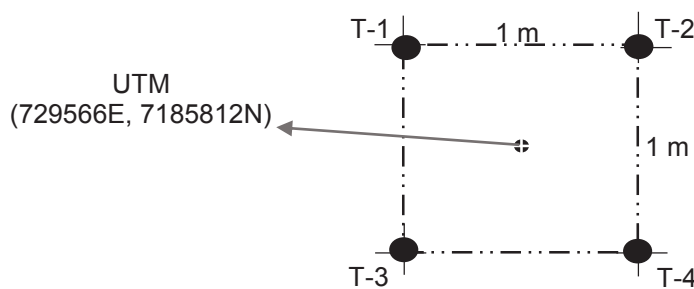
O tensiômetro é um instrumento que fornece a sucção matricial do solo, de acordo com a profundidade em que foi instalado. A série de dados utilizada neste trabalho pertence ao arquivo do ITCG, antiga Mineropar, que nos anos de 2012 e 2013 instalou e realizou as leituras dos tensiômetros no local correspondente à área de estudo deste trabalho. Após este período, os equipamentos foram retirados do local.

Como foi realizado o ensaio para determinação da curva de retenção de água no solo em laboratório, a sucção obtida por meio dos tensiômetros pôde então ser convertida em termos de umidade volumétrica, para a caracterização da umidade observada em campo. Os tensiômetros foram instalados nas coordenadas UTM, Fuso 22S (729566 E, 7185812 N), no local denominado Buraco da Onça, conforme pode ser observado na Figura 17, totalizando 4 equipamentos no total. Cada tensiômetro foi instalado em diferentes profundidades, de 15, 45, 60 e 90 cm, com a finalidade de

determinar as variações de tensão matricial nestes níveis, de acordo com a dinâmica da água associada aos eventos pluviométricos.

Foram realizadas leituras diárias nos instrumentos, em períodos intermitentes, entre 03/10/2012 e 22/05/2013, sendo utilizadas as leituras deste intervalo nas análises deste trabalho, visto que os tensiômetros já foram removidos do local. Os instrumentos foram dispostos entre si no terreno e em relação às coordenadas UTM (Fuso 22S), de acordo com a Figura 25:

Figura 25 – Disposição dos tensiômetros no terreno



Fonte: O autor

Os tensiômetros são compostos por um tubo de PVC de 0,5 polegada, sendo que na ponta instalada no terreno, encontra-se um elemento poroso de cerâmica. A extremidade que fica para fora do solo é fechada, e tem um manômetro instalado para a leitura das pressões. Para a instalação no terreno, executou-se furos a trado, até a profundidade desejada. Após instalado, encheu-se o furo de água e aplicou-se o vácuo. Depois da calibração e validação do equipamento, procedeu-se as leituras. Os manômetros dos tensiômetros utilizados fornecem valores de pressão em mmHg, e foram corrigidos em função do comprimento do instrumento, de acordo com a equação (10) (FAGUNDES, 2010):

$$\psi = \frac{L(mmHg)}{7,5054} - 10 h \quad (10)$$

Onde:

ψ = Sucção matricial (kPa);

L = Leitura do manômetro em mmHg;

h = Comprimento medido entre o meio da pedra porosa e o manômetro, em metros.

4.1.1.5 Parâmetros de resistência e condutividade hidráulica

Em relação aos parâmetros de resistência, para o solo residual foram adotados valores médios dos resultados obtidos por Lopes (2013), quando este estudou a influência da espessura da camada e da profundidade do lençol freático na estabilidade, no mesmo morro em estudo, porém, na AR-04, conforme os pontos alocados na Figura 17. De acordo com a Figura 13, o substrato rochoso presente na AR-04 é o mesmo que predomina na AR-01 em estudo (granito porfírico). Em relação às formações superficiais, ambas as áreas estão localizadas em solos residuais no topo do relevo. A Tabela 8 sintetiza os ensaios, pretéritos à elaboração desse estudo, realizados por Lopes (2013).

Tabela 8 – Parâmetros de resistência, massa específica dos grãos e permeabilidade saturada

Amostra	Profundidade (m)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (graus)	Massa específica dos grãos (g/cm³)	Permeabilidade saturada média - Ks média (mm/h)
T1-a	0,8	0	32,62	2,62	44,428
T1-b	1,7	5,3	29,9	2,32	0,035
T1-c	2,4	4,35	31,26	2,63	0,003
T1-e	4,73	3	29,86	2,59	106,534
T2-a	0,9	5,15	31,76	2,77	-
T2-b	1,9	10,95	27,7	2,63	-
T2-c	3,39	15,25	24,56	2,62	-
T2-d	4,0	4,35	29,34	2,64	-
T2-e	5,15	0	34,14	2,70	-

Fonte: adaptado de LOPES (2013)

Segundo Lopes (2013), as amostras indeformadas para os ensaios de cisalhamento direto foram retiradas das trincheiras em cilindros de PVC medindo 20 cm de altura por 15 cm de diâmetro. As profundidades de coleta foram definidas de forma a representar a variação dos horizontes do solo identificados visualmente, e os ensaios de cisalhamento direto foram realizados de acordo com a norma ASTM D3080 (1998) em uma prensa. As tensões adensamento da amostra utilizadas foram de 200,

100 e 50 kPa durante aproximadamente 24 horas, para então ser iniciado o cisalhamento direto. Em relação aos parâmetros de resistência para o solo coluvionar e saprolítico foram adotados valores médios de diversas bibliografias referentes à Serra do Mar (VOGT, 2012; VICTORINO, 2015; MILLAN COY, 2015; FERREIRA, 2017; GONZÁLEZ, 2017), e também com referência na Tabela 1.

Para a condutividade hidráulica, foi utilizada a fórmula de correlação empírica de Fredlund *et al.* (1994) indicada na Tabela 3. A permeabilidade saturada trata-se de um parâmetro de entrada para o cálculo da condutividade nesta formulação. Desta maneira, para o solo residual foi utilizada a permeabilidade saturada ensaiada por Lopes (2013) em amostras indeformadas no Laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG) do departamento de Geografia da UFPR, com um permeâmetro de carga decrescente (Tabela 8). Para o solo coluvionar e saprolítico, utilizou-se do valor típico para o solo composto por argila e silte, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Valores típicos de permeabilidade em solos saturados

Tipo de solo	k_{sat} (cm/s)
Pedregulho limpo	100 - 1,0
Areia grossa	1,0 - 0,01
Areia fina	0,01 – 0,001
Argila com silte	0,001 – 0,00001
Argila	<0,00001

Fonte: adaptado de DAS (2014)

4.1.2 Dados Geomorfológicos

Para a elaboração de perfis geotécnicos representativos do talude em estudo, foram utilizados os dados de cotas topográficas e dados de sensoriamento remoto por radar, realizados pela empresa Bradar e fornecidas pelo ITCG (Mineropar). O modelo digital do terreno fornecido pela Bradar utilizou-se de ortoimagens em Banda P de aproximadamente 400 MHz, com resolução espacial de 2,5 cm. Estas características foram utilizadas para estimar a amplitude e declividade média do talude, e assim elaborar os perfis representativos do terreno.

Para a definição dos horizontes de solo, foi analisado um conjunto de dados, informações e levantamentos pretéritos do morro em estudo. Foi utilizado o levantamento dos perfis do solo (AA) e sondagens a trado (ST) realizados por Mineropar (2013). As seções de solo (AA) foram montadas a partir de perfis locais, descritos em taludes naturais, principalmente escarpas de movimentos de massa recentes e escavados (MINEROPAR, 2013). A alocação dos pontos onde foram realizados tais levantamentos pode ser vista na Figura 17.

Concomitantemente, foi levado em consideração as informações levantadas por Mineropar (2013), as quais estão sintetizadas no capítulo 3, mais especificamente, no item 3.1, além dos resultados dos ensaios geotécnicos e mapas da região. Extraíram-se também informações levantadas por Lopes (2013), como profundidade do nível d'água e espessura do maciço. Por fim, de modo a complementar e amarrar todas as informações, foram realizadas visitas ao local, no qual foi possível detectar a presença de afloramentos rochosos, matacões e a variação geotécnica através de ensaios nas amostras de solo colhidas. Dessa forma, foi definido os perfis do talude analisado, de acordo com o comprimento total, inclinações superficiais e a estratificação do solo.

4.1.3 Dados Pluviométricos

Os eventos pluviométricos que ocasionam movimentos gravitacionais de massa ocorrem com intensidades e durações diversas. Para compreender a dinâmica do processo, deve-se arbitrar critérios que relacionem a intensidade, duração e volume de chuva acumulado com os processos instabilizantes em deslizamentos de taludes.

Para coleta dos dados de chuva, foi utilizado o pluviógrafo localizado no Morro do Bom Brinquedo, sob responsabilidade da Simepar, de nome Samae Antonina (código nº 25434872), nas coordenadas UTM (729.284,73 E; 7.185.386,12 N) Fuso 22S, conforme indicado na Figura 17. Este equipamento está em operação desde 15/05/2012, sendo registradas as leituras dentro de um intervalo de 15 minutos. Foi utilizado um segundo pluviógrafo nas análises, que está instalado a cerca de 30 km do Morro do Bom Brinquedo, localizado em Cachoeira de Cima, na cidade de Antonina, de código nº 25134848, o qual está em funcionamento desde de 1999, e fornece leituras horárias. Apesar da considerável distância entre os dois pluviógrafos, foi utilizado este segundo equipamento por ser o único do município com leituras

anteriores à 2011, podendo assim aumentar e complementar o banco de dados pluviométricos para as análises estatísticas.

A consistência dos dados pluviométricos foi realizada pelo setor de hidrologia do SIMEPAR, que inseriu os dados em linguagem Python para comparação das duas estações supracitadas, de modo a filtrar valores considerados irrealistas e calcular o período de tempo que a estação registrou dados suspeitos ou sem registro de dados. A consistência também contemplou a análise visual dos pluviogramas, identificando padrões distintos entre estações com regime de chuva semelhante, os quais podem estar associados à falha de dados.

Após, o setor de hidrologia do SIMEPAR realizou a eliminação automática de dados suspeitos através da aplicação de filtros com valores máximos e mínimos aceitáveis, sendo eliminados os valores negativos e valores de chuva acima de 100 mm em um intervalo de 1 hora, que representa um valor extremo de precipitação, sendo considerado suspeito. As medições contendo dados considerados suspeitos foram atribuídos como nulos, pois devido à complexidade e grande imprecisão no preenchimento de falhas de dados pluviométricos, este procedimento não foi realizado por configurar consideráveis erros, tornando os resultados menos confiáveis. A taxa de falha encontrada para os pluviógrafos de Antonina foi de 2,45%.

Para a correlação dos dados pluviométricos com a sucção registrada pelo tensiômetro foi utilizada a precipitação acumulada, em mm/dia, do pluviógrafo Samae Antonina, localizado no Morro do Bom Brinquedo. Para a análise do regime de chuvas, foi realizado o tratamento estatístico da base de dados, onde foram determinados inicialmente valores máximos e médios mensais e máximas precipitações anuais das séries históricas. Para esta análise estatística foi utilizado ambos os pluviógrafos, o do Morro do Bom Brinquedo e o localizado em Cachoeira de Cima, para obtenção de uma maior série amostral.

Para a classificação da precipitação em relação à sua intensidade de precipitação acumulada, foi utilizado a referência de Leite *et al.* (2011): chuvisco (0,1 a 2,5 mm), chuva fraca (2,5 a 10,0 mm), chuva moderada (10,0 a 25,0 mm), chuva forte (25,0 a 50,0 mm) e chuva extrema (acima de 50 mm). Para complementar esta referência, foi utilizado a classificação de Souza *et al.* (2012), que considerou até 150 mm chuva extrema, e precipitações acima de 150 mm como chuva muito extrema. A Tabela 10 apresenta a classificação das precipitações (P) diárias utilizadas no trabalho de Leite *et al.* (2011) e SOUZA *et al.* (2012), os quais também serviram de

base para as análises do Morro do Bom Brinquedo, sendo possível identificar classes desde dias considerados secos até chuvas muito extremas.

Tabela 10 – Classificação das precipitações (P) acumuladas

Intensidade (mm)	Classificação
$P \leq 0,1$	Dia Seco
$0,1 < P \leq 2,5$	Chuvisco
$2,5 < P \leq 10$	Chuva Fraca
$10 < P \leq 25$	Chuva Moderada
$25 < P \leq 50$	Chuva Forte
$50 < P \leq 150$	Chuva Extrema
$P > 150$	Chuva Muito Extrema

Fonte: adaptado de Leite *et al.* (2011) e SOUZA *et al.* (2012)

Para a determinação da curva IDF, foram levantadas as intensidades máximas anuais das duas séries históricas do município, para tempos de duração da chuva pré-determinados, compreendendo o intervalo entre os anos de 2000 e 2017. Os tempos de duração (t) das precipitações foram considerados como 1, 3, 6, 12, 24, 48 e 72 horas para este estudo. Após, foi aplicado os conceitos do método da curva IDF, para analisar a relação entre a intensidade e a duração dos eventos pluviométricos da região, para períodos de retorno (T_R) de até 200 anos.

Depois da determinação dos valores máximos de acordo com cada duração, procurou-se ajustar estes dados a uma distribuição de probabilidade, para relacionar com eventos que venham a ocorrer em um grande período de recorrência. Foi utilizado a distribuição de Gumbel (GUMBEL, 1949) para ajustar as séries de dados, visto que esta se adequa bem a séries extremas de dados de variáveis hidrológicas. Como o interesse foi estudar os valores máximos prováveis de um fenômeno, os valores máximos da série anual foram ordenados no sentido decrescente.

A distribuição de Gumbel (GUMBEL, 1949) assume que os valores de “x” são limitados apenas no sentido positivo, ou seja, a parte que trata dos valores máximos menos frequentes é do tipo exponencial, sendo que a função tem a forma da equação (11):

$$P' = 1 - e^{-e^{-\gamma}} \quad (11)$$

Onde:

P' = probabilidade de o evento ocorrer;

e = número de Euler;

γ = variável reduzida da distribuição Gumbel.

A probabilidade P' reflete a possibilidade de que o valor extremo seja igual ou superior a um valor " x_T ", e $(1 - P')$, de que o valor extremo seja inferior a " x_T ". Dessa maneira, o período de retorno correspondente ao valor " x_T ", no qual o número de anos representa o tempo necessário para que esse valor máximo seja igualado ou superado, foi obtido pela equação (12):

$$T_R = \frac{1}{P'} \quad (12)$$

Onde:

T_R = período de retorno em anos.

Substituindo a equação (12) na função de probabilidade (equação (11)), o período de retorno (T_R) pode ser estimado da seguinte forma (equação (13)):

$$T_R = \frac{1}{1 - e^{-e^{-\gamma}}} \quad (13)$$

A variável reduzida de Gumbel " γ " tem o seu valor deduzido a partir da aplicação de duas vezes o logaritmo neperiano na função de probabilidade. Desse modo, esta variável pode ser obtida por meio da equação (14), para cada período de retorno desejado:

$$\gamma = -\ln[-\ln(1 - \frac{1}{T_R})] \quad (14)$$

Empregando-se esta distribuição, as frequências teóricas podem ser calculadas a partir da média e do desvio padrão da série de valores máximos, para todos os tempos de duração elegidos. Para a determinação do valor máximo de um evento extremo para um determinado período de retorno pela distribuição de Gumbel, aplica-se a seguinte relação (equação (15)):

$$x_T = \bar{x} + S_x * \left(\frac{y - \bar{y}_n}{S_n} \right) \quad (15)$$

Onde:

x_T = valor extremo com período de retorno T_R ,

S_x = desvio padrão amostral dos valores extremos,

\bar{x} = média dos valores extremos de precipitação,

\bar{y}_n = média da variável reduzida de Gumbel,

S_n = desvio padrão da variável reduzida de Gumbel.

De posse dos valores de distribuição das variáveis máximas, calculou-se a intensidade máxima de cada evento extremo, de acordo com o tempo de duração (t) determinado para cada uma delas. Para o ajuste dos dados à equação (7), aplicou-se uma regressão não-linear de forma iterativa (LABFIT), até que se atingisse um critério aceitável de convergência dos pontos para a determinação dos parâmetros que correlacionam os dados para a localidade de Antonina. Para a avaliação do ajuste foi considerado o erro absoluto médio produzido pelo modelo em relação aos dados obtidos pela distribuição de Gumbel, conforme equação (16):

$$\varepsilon = n^{-1} \sum_{i=1}^{nd} |x_t - x_i| \quad (16)$$

Onde:

ε = erro absoluto médio (mm/h);

x_t = valor da intensidade de precipitação calculada pela equação de Gumbel (mm/h);

x_i = valor da intensidade de precipitação estimada pelo ajuste não-linear das curvas (mm/h).

4.2 ANÁLISE NUMÉRICA

Os modelos matemáticos de estabilidade de taludes levam em consideração informações detalhadas da base física das encostas e são baseados nos princípios da mecânica dos solos. Estes métodos têm por objetivo diminuir a subjetividade na análise de rupturas, pois busca estabelecer a suscetibilidade ao deslizamento de acordo com valores absolutos, por meio do cálculo do fator de segurança (GERSCOVICH *et al.*, 2015). Para a realização da análise numérica, foi utilizado o *software* GeoStudio em suas extensões SEEP/W para a análise transiente e SLOPE/W para análise mecânica, aplicados em perfis representativos do talude da vertente sul do Morro do Bom Brinquedo. Para a modelagem, foi necessário a elaboração de cenários de precipitação, de acordo com o resultado da análise dos dados pluviométricos e da análise integrada do local.

Vale destacar que foram seguidas as práticas recomendadas no manual do *software* para determinar condições de contorno, parâmetros para condições iniciais e a variação de poro pressão devido à precipitação aplicada no modelo. Ou seja, executou-se diversos experimentos numéricos para a obtenção da calibração do modelo. Nessa etapa foi definido a superfície de ruptura, o número de iterações e as especificações da malha que melhor se adequam ao problema correspondente.

4.2.1 Análise de fluxo

Na avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos, a pesquisa foi realizada com base na análise de fluxo em regime transiente, que utiliza o método de elementos finitos. Como destacado por Fredlund e Rahardjo (1993), em geral, o processo de infiltração é tratado desta maneira por responder de forma coerente às condições de contorno de variação de umidade do solo. Na análise de fluxo transiente, o número máximo de iterações para convergência foi de 2000, com tolerância de divergência de 0,01.

Com fins de identificar e compreender o desenvolvimento da poro pressão no interior do maciço de acordo com a variação da precipitação aplicada e para diferentes

declividades, foram definidas três subseções em cada perfil para realizar tal medição. A localização dessas subseções teve por objetivo analisar o processo de infiltração em diversos setores de declividade e tipo de solo, além de identificar os locais que apresentam maior variação da sucção matricial para os cenários de chuva. Foi perscrutado até a profundidade de 5 metros, haja visto que a intenção era avaliar a frente de umedecimento devido à variação pluviométrica.

4.2.1.1 Definição das condições de contorno

Para a correta simulação da situação em estudo, com análises coerentes e confiáveis, foram aplicadas condições de contorno de modo que a modelagem se aproxime das condições em campo. As condições iniciais da condição de fluxo e pressão no interior do maciço influenciam diretamente na capacidade de infiltração do solo. De acordo com o manual do *software* SEEP/W, não há regras rígidas para a estabilização dos níveis de sucção iniciais, sendo necessário a variação dos parâmetros até que uma solução razoável seja atingida.

À vista disso, a condição inicial de poro pressão nos perfis foi definida através da interpolação linear a partir da linha freática (poro pressão=0 kPa) em modelo de fluxo transiente com duração de 4 dias. Isto foi feito para alcançar uma condição de sucção na superfície do terreno de 10 kPa, que corresponde à umidade de 32% no solo residual, de acordo com os dados do tensiômetro e da curva de retenção de água no solo. Este valor foi adotado por representar uma das umidades mais baixas registradas no período analisado. Por sua vez, isso possibilita criar uma situação próxima do real para o solo não saturado, e assim avaliar a brusca perda de resistência após a ocorrência de precipitações.

A modelagem hidromecânica foi realizada em fluxo transiente, desconsiderando os processos de evapotranspiração e *run-off* em decorrência dos eventos de chuva na superfície do terreno. Utilizou-se a condição de contorno do tipo q (fluxo através da superfície), para aplicação da condição de infiltração devido à ocorrência da precipitação. Aplicou-se também a condição de contorno que representa a carga total (H), adotando-se 11 m.c.a. a jusante em ambos os perfis, e a montante os valores de 110 e 82 m.c.a., nos perfis L01 e L02, respectivamente.

Para as camadas de solo não saturado foi necessário estabelecer um valor de sucção matricial máxima a qual seria implementada na modelagem. A máxima

poro pressão negativa registrada pelos tensiômetros foi de 75,8 kPa na camada superficial (15 cm). Visto que essa medida foi levantada nos períodos mais chuvosos do local (verão e primavera), que as medidas em campo no solo coluvionar não foram realizadas, ou ainda, que o tensiômetro instalado apresenta como limite de operação 80 kPa, extrapolou-se o valor máximo para 120 kPa para a sucção matricial.

4.2.2 Análise de estabilidade

Os parâmetros dos perfis provenientes da análise de infiltração foram exportados para o SLOPE/W, no qual foi analisado a estabilidade do talude através do cálculo do fator de segurança, utilizando o método do equilíbrio limite com base na formulação de Morgenstern-Price. Este modelo foi adotado por englobar uma análise de equilíbrio de forças e momentos para cada lamela que compõe as cunhas de ruptura, sendo considerado um dos métodos mais completos de avaliação da estabilidade. Na análise da estabilidade, para as camadas de solo não saturado adotaram-se as curvas de retenção e de condutividade hidráulica calculadas e apresentadas neste trabalho. A profundidade mínima adotada para a superfície de ruptura foi de 1 m, com número máximo de fatias de 50. O número máximo de iterações para a convergência do modelo foi de 2.000, com tolerância de divergência de 0,001.

Para a definição dos parâmetros de resistência do solo residual, utilizou-se o valor de $30,91^\circ$ para o ângulo de atrito e 3,16 kPa de coesão efetiva - que correspondem à média dos resultados dos ensaios realizados por Lopes (2013) no local T1 (Tabela 8). Em relação aos parâmetros de resistência para o solo coluvionar e saprolítico foram adotados valores médios de diversas bibliografias referentes à Serra do Mar, sendo $27,1^\circ$ de ângulo de atrito e 9,91 kPa de coesão para o solo coluvionar, enquanto o solo saprolítico foi assumido com atrito interno de 42° e coesão de 11 kPa. (VOGT, 2012; VICTORINO, 2015; MILLAN COY, 2015; FERREIRA, 2017; GONZÁLEZ, 2017). O peso específico adotado foi de 17,0, 16,0 e 18,0 kN/m³ para os solos residual, coluvionar e saprolítico, respectivamente, os quais foram adotados de acordo com os ensaios realizados e também conforme a bibliografia consultada nos parâmetros de resistência.

Os valores adotados para a resistência foram bibliográficos, porém, levando em consideração que a determinação de dados geotécnicos é encoberta de incertezas

inerentes aos processos de ensaio e coletas de dados, que existe certa variabilidade espacial, além da importância fundamental dos mesmos no cenário de instabilidade, foi aplicado a função de Probabilidade Normal para os dados de atrito interno e coesão, dentro do *GeoStudio*, através de 200 iterações pelo Método de Monte Carlo, para os solos coluvionar e residual. A análise de estabilidade sucedeu-se para cada perfil e para cada cenário de chuva pré-determinado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é dedicado à apresentação e discussão dos resultados desta dissertação, que inclui os ensaios de caracterização, ensaio de sucção, análise estatística dos valores de precipitação e geração da curva IDF para o local de estudo. Além disso, apresenta-se os resultados da análise integrada dos valores de sucção, umidade e chuva, através da correlação e análise de dados da série histórica de tensiômetros do local. Por fim, este capítulo apresenta a elaboração de dois perfis da vertente estudada para aplicação em um modelo computacional utilizando o método do equilíbrio limite, com análise antecedente de fluxo.

5.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para se obter os parâmetros geotécnicos de entrada no modelo proposto foi realizada uma campanha de coleta de amostras na vertente Sul do Morro do Bom Brinquedo. Foram retiradas amostras em 5 locais distintos, os quais estão ilustrados na Figura 26.

Os ensaios realizados para o solo correspondem à caracterização e sucção pelo método do papel filtro, além da aplicação de correlação para o restante dos parâmetros. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos para o teor de umidade natural, peso específico natural, densidade real dos grãos e os índices de consistência (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade).

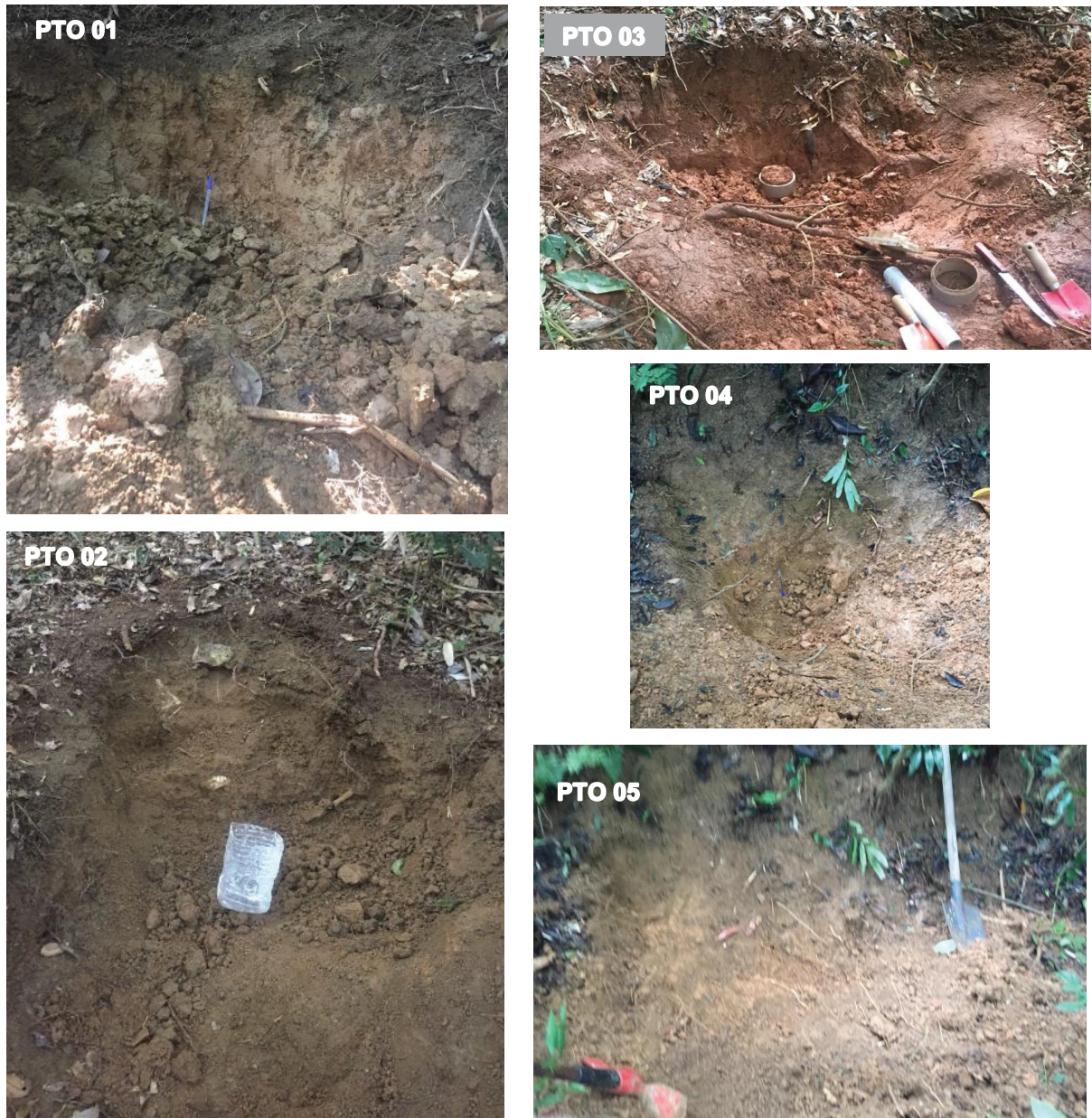
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de caracterização

PONTO	Classificação solo (*)	w (%)	γ_n (kN/m ³)	D	L _L (%)	L _P (%)	I _P (%)
01	Residual de granito	35,60	16,28	2,616	81	45	37
02	Residual de granito	22,04	15,47	2,545	51	35	16
03	Solo transportado Coluvionar	40,72	16,93	2,730	60	37	24
04	Residual de granito	27,65	17,07	2,247	58	45	13
05	Solo transportado Coluvionar	40,40	15,99	2,692	59	45	14

(*) De acordo com Mineropar (2013); w= umidade natural da amostra em campo; γ_n = peso específico natural; D= densidade real do solo (DNER-ME 093/94); L_L= limite de liquidez; L_P= limite de plasticidade; I_P=índice de plasticidade.

Fonte: O autor

Figura 26 – Poços dos pontos de coleta



Fonte: O autor

Os limites de liquidez variaram entre 51% e 81%, sendo que os solos coluvionares (pontos 03 e 05) apresentaram valores próximos, e o restante, residual, apresentou maior variação entre os pontos. Os limites de plasticidade tiveram uma variação menor entre os pontos, de 35% a 45%, sendo que os pontos 01, 04 e 05, apresentaram o mesmo índice de 45%. Ao comparar os resultados de umidade encontrados em campo, conclui-se que os solos residuais apresentaram em média, valores mais baixos de umidade do que os solos coluvionares, sendo que estes últimos resultaram em um teor de umidade de cerca de 40%.

A maior densidade real dos grãos do solo foi apresentada pela amostra do ponto 03, com valor de 2,730. Quando comparado com os valores encontrados por Mineropar (2013) (Tabela 6) estes apresentaram certa variação, principalmente em relação aos pontos 04 e 02 obtidos por esta autora. Porém, as dispersões encontradas nos resultados obtidos em laboratório e os dados da Mineropar (2013) podem ser justificadas devido à grande variação espacial dos parâmetros geotécnicos, bem como a diferença na profundidade de coleta das amostras.

Através dos dados levantados em laboratório, foi realizada a correlação dos índices físicos correspondentes à cada uma das amostras coletadas, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Índices físicos correlacionados

PONTO	γ_s (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e	n	S (%)
01	26,16	17,41	12,00	1,18	0,54	78,96
02	25,45	17,70	12,68	1,01	0,50	55,68
03	27,30	17,62	12,03	1,27	0,56	87,61
04	22,47	17,42	13,38	0,68	0,40	91,38
05	26,92	17,16	11,39	1,36	0,58	79,79

γ_s = peso específico dos grãos; γ_{sat} = peso específico saturado
 γ_d = peso específico seco; e = índice de vazios; n = porosidade;
 S = grau de saturação

Fonte: O autor

De uma maneira geral, os resultados encontrados para o peso específico saturado e o peso específico seco apresentaram pouca dispersão dos dados. A porosidade é um fator relevante para este trabalho, pois está diretamente relacionada com a capacidade volumétrica de armazenamento de água nos solos. O índice da porosidade foi utilizado para encontrar o valor nulo da sucção, pois corresponde à transição do solo não saturado para a condição saturada. A menor capacidade de armazenamento foi identificada na amostra do ponto 4, com porosidade de 0,40 e índice de vazios de 0,68, além de apresentar o maior grau de saturação *in situ*. Dentre os parâmetros constantes na Tabela 11 e Tabela 12, os índices correspondentes ao solo coluvionar transportado apresentaram menor dispersão nos dados, apresentando uma composição mais similar e homogênea.

A curva granulométrica (Figura 27) foi encontrada para os solos em questão, e as porcentagens de material para cada intervalo estão sintetizados na Tabela 13, de acordo com a classificação da NBR 6502/1995.

Tabela 13 – Resultados dos Ensaio de Granulometria

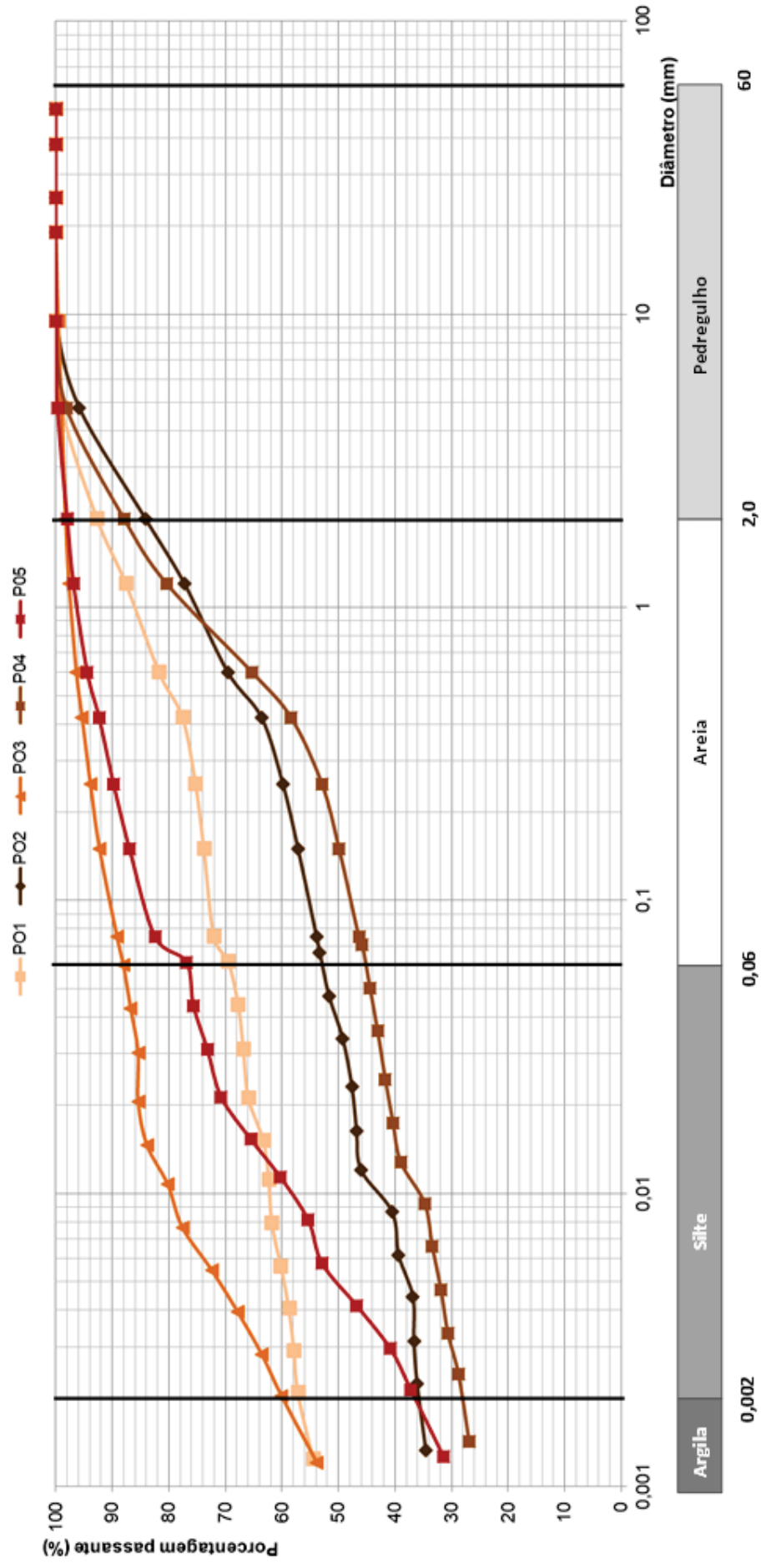
PONTO	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)	Classificação Granulométrica
01	59,65	12,42	23,37	7,26	Argila areno-siltosa
02	35,70	17,07	31,35	15,87	Argila areno-siltosa
03	59,83	28,24	10,21	1,72	Argila Silto-arenosa
04	28,01	17,09	42,84	12,06	Areia argilo-siltosa
05	36,31	40,50	21,19	2,00	Silte argilo-arenoso

Fonte: O autor

Os solos da vertente sul do Morro do Bom Brinquedo apresentaram, na sua maioria, granulometria predominantemente fina, com mais de 50% dos grãos passando na peneira nº 200, com exceção do solo do ponto 04, que apresentou 42,84% de fração arenosa. O ponto 05 apresentou predominância de 40,50% de silte, e os pontos 01, 02 e 03 apresentaram como maior porcentagem granulométrica a fração argilosa.

De forma geral, o formato das curvas é semelhante entre os solos residuais (01, 02 e 04) e entre os dois coluvionares (03 e 05). Os pontos 02 e 04 amostrados apresentaram porcentagens significativas de pedregulho e areia, aproximando-se das características de um solo saprolítico. Apesar dos solos coluvionares apresentarem uma maior variabilidade dos grãos, os mesmos apresentaram pequena quantidade de pedregulho e grande predominância de finos, similares à solos sedimentados. O ponto 01 pode ser considerado uma amostra com características intermediárias entre os outros dois tipos, aproximando-se de um solo laterítico.

Figura 27 – Curva Granulométrica



Fonte: O autor

5.2 ENSAIO DE SUCÇÃO PELO MÉTODO DO PAPEL FILTRO

O ensaio de sucção do solo foi realizado através do método do papel filtro para obtenção da Curva de Retenção de Água do Solo. Como foi mencionado no capítulo 4, procedeu-se a coleta de dados em 5 pontos, com 10 amostras cada, sendo que o ensaio foi repetido 3 vezes para cada amostra e com dois papéis de medição de umidade cada, resultando em 300 pares de sucção *versus* umidade. De posse do par ordenado, buscou-se ajustar os dados às relações empíricas consagradas na literatura, como a de Van Genuchten (1980) e de Fredlund e Xing (1994), presentes na Tabela 2. Porém, não foi possível fazer um ajuste satisfatório, visto que estas relações matemáticas são para curvas uni-modais, e o solo apresentou característica bimodal.

Portanto, por meio de planilha eletrônica, a curva característica foi traçada com o uso do *software* LABFIT, desenvolvido por Silva *et al.* (2004). A curva de retenção de água no solo foi definida matematicamente por duas equações, sendo delimitado o intervalo de cada pelos patamares de sucção apresentados para cada amostra. O valor mínimo adotado para a sucção foi o correspondente ao valor da porosidade calculada para cada solo, pois nesta condição todos os vazios estariam preenchidos por água, e o solo deixa de apresentar sucção por estar na condição saturada. Isto posto, as curvas de retenção de umedecimento e secagem que se ajustam aos dados experimentais, para cada ponto amostrado, estão apresentadas da Figura 28 à Figura 32.

Na curva de retenção de água no solo, o valor de entrada de ar nos diferentes níveis de poros, representa o valor da máxima sucção sem que ocorra drenagem no poro correspondente. Já o teor de umidade residual representa a mudança de patamar, ou seja, umidade a partir do qual um diferente tamanho de poro passa a ser drenado, com o aumento do valor da sucção aplicada.

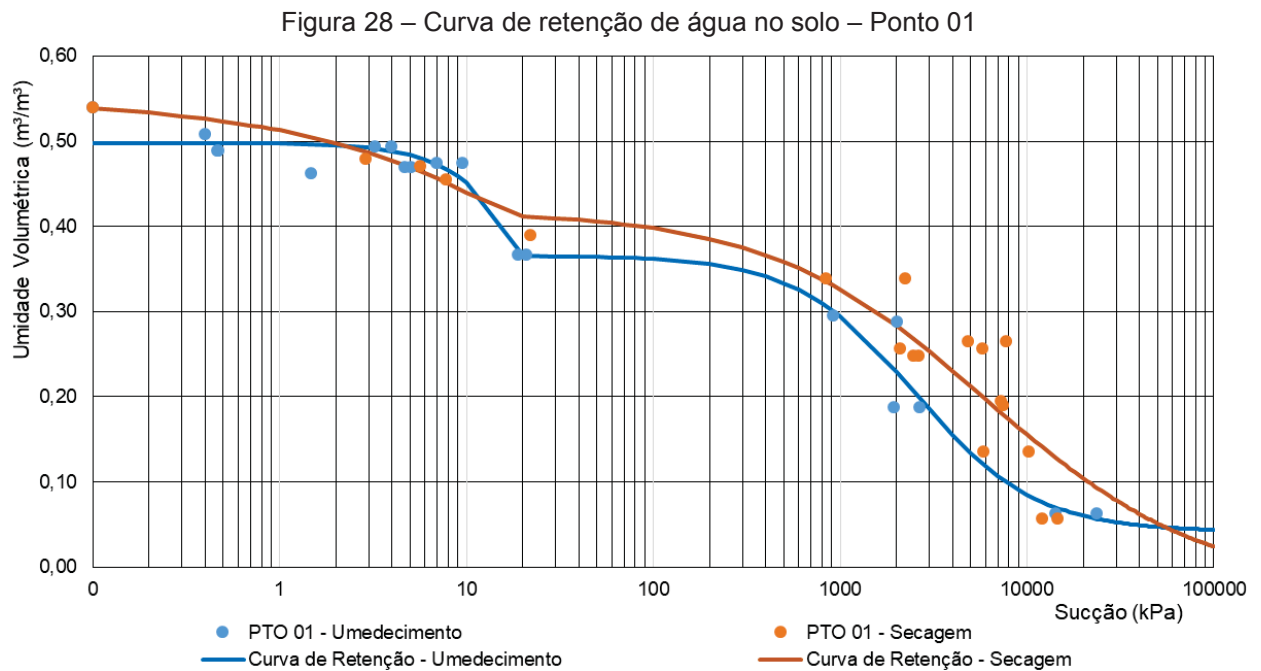
Para o ponto 01, a primeira parte da curva de umedecimento corresponde à sucção de 0 a 20 kPa, de acordo com a equação (17), sendo que para valores superiores à 20 kPa, a curva foi definida pela equação (18). A curva de secagem também apresentou dois patamares, representados pelas equações (19) e (20), para os intervalos de 0 a 20 kPa e maiores que 20 kPa, respectivamente:

$$\theta_{w1,1} = \frac{1,00}{(0,94 + 7,78 * 10^{-4} * \psi^{1,74})} - 0,57 \quad (17)$$

$$\theta_{w2,1} = \frac{1,00}{(3,08 + 7,55 * 10^{-5} * \psi^{1,36})} + 0,04 \quad (18)$$

$$\theta_{d1,1} = \frac{1,00}{(0,66 + 1,68 * 10^{-2} * \psi^{0,49})} - 0,97 \quad (19)$$

$$\theta_{d2,1} = \frac{1,00}{(2,26 + 3,50 * 10^{-3} * \psi^{0,74})} - 0,03 \quad (20)$$



Fonte: O autor

O ponto 01 apresentou certa dispersão dos dados, principalmente em relação aos pontos de secagem. Esta amostra teve o maior percentual de descarte dos papéis ensaiados, devido à contaminação de solo após o período de equilíbrio. Assim, apesar de poucos pontos, as curvas tiveram bom ajuste aos pontos experimentais, apresentando certa histerese entre os valores de umedecimento e secagem, no qual este último apresentou valores ligeiramente superiores. Ou seja, para a mesma

umidade os valores de sucção apresentados pelo solo são superiores em um processo de secagem.

O ponto 02 foi retirado próximo ao local dos tensiômetros, estando localizado sobre solo classificado como residual. Para os pontos de umedecimento, estes ficaram definidos entre o intervalo de 0 a 10 kPa, de acordo com a equação (21) e para valores superiores a 10 kPa, pela equação (22):

$$\theta_{w1,2} = \frac{1,00}{(4,61 + 0,40 * \psi^{1,80})} + 0,28 \quad (21)$$

$$\theta_{w2,2} = \frac{1,00}{(3,68 + 8,83 * 10^{-4} * \psi^{0,95})} + 1,11 * 10^{-3} \quad (22)$$

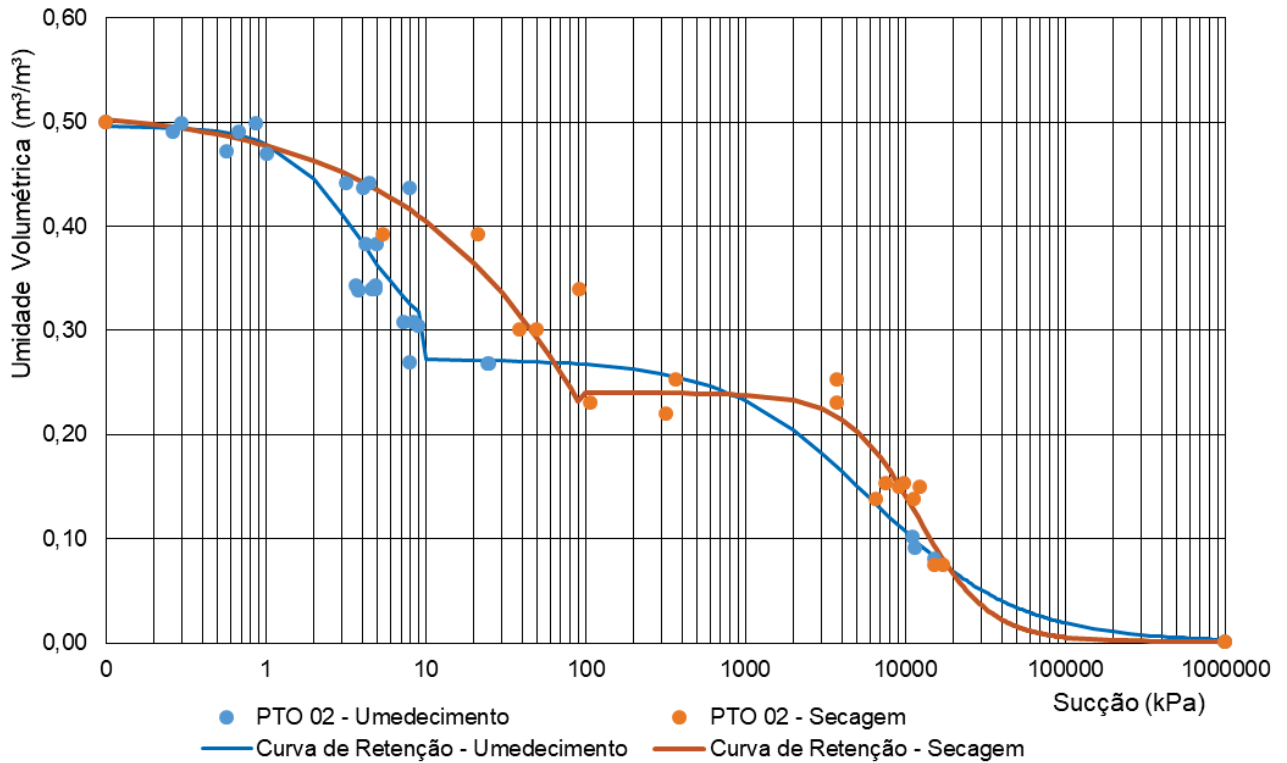
Devido ao fenômeno de histerese, a curva de secagem apresentou um diferente intervalo dos dados de sucção entre os dois patamares, em relação à curva de umedecimento para o ponto 02. Entre 0 e 100 kPa, a curva de secagem apresentou a forma da equação (23) e para valores superiores a 100 kPa, a curva que se ajusta aos pontos é definida pela equação (24):

$$\theta_{d1,2} = \frac{1,00}{(0,66 + 0,02 * \psi^{0,49})} - 1,00 \quad (23)$$

$$\theta_{d2,2} = \frac{1,00}{(4,19 + 5,50 * 10^{-8} * \psi^{1,93})} + 1,46 * 10^{-3} \quad (24)$$

As curvas de ajuste do ponto 02 apresentaram boa relação com os dados de ensaio, com pouca dispersão. A pressão de entrada de ar para a curva de umedecimento foi de 1,2 kPa para a região superior, correspondente aos macroporos, e de 500 kPa na região dos microporos. Por sua vez, a curva de secagem apresentou entrada de ar na região dos macroporos quando a sucção era cerca de 2 kPa, e para os microporos em 3.800 kPa. Em decorrência disso, o fenômeno de histerese tem maior influência para situações com altos níveis de sucção.

Figura 29 – Curva de retenção de água no solo – Ponto 02



Fonte: O autor

O ponto 03, localizado mais ao sopé da encosta estudada, foi classificado como um solo coluvionar, com cerca de 88% de finos em sua composição, sendo em sua maioria argila. Com a umidade volumétrica máxima considerada como 56%, a curva de umedecimento apresentou dois patamares de variação, entre 0 e 80 kPa (equação (25)) e para valores maiores que 80 kPa (equação (26)). Para compor a curva de secagem, valores menores que 500 kPa foram definidos pela equação (27), e valores maiores que 500 kPa foram ajustados pela equação (28).

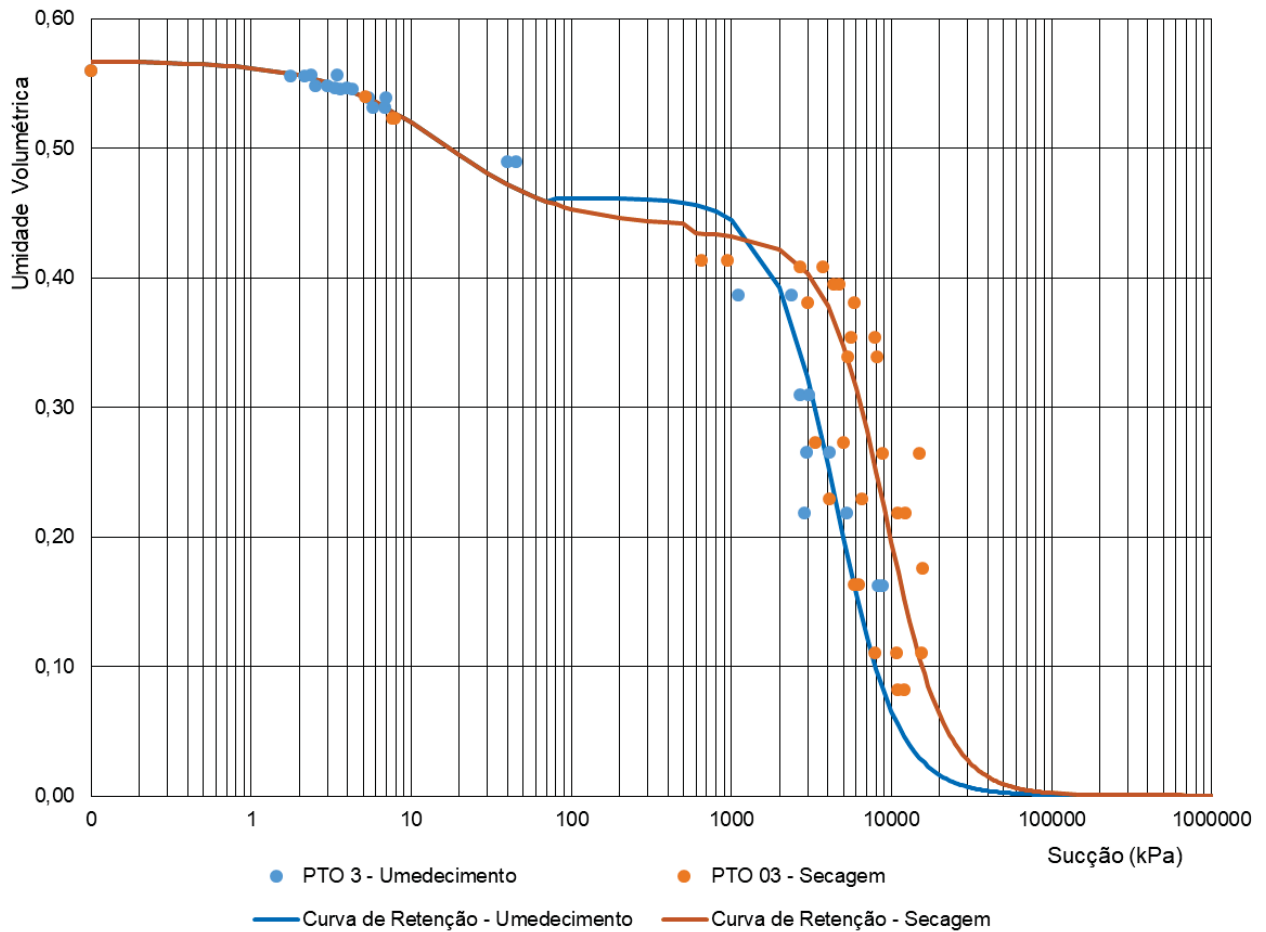
$$\theta_{w1,3} = \frac{1,00}{(7,87 + 0,33 * \psi^{1,16})} + 0,44 \quad (25)$$

$$\theta_{w2,3} = \frac{1,00}{(2,17 + 1,94 * 10^{-8} * \psi^{2,21})} + 4,24 * 10^{-4} \quad (26)$$

$$\theta_{d1,3} = \frac{1,00}{(7,87 + 0,33 * \psi^{1,16})} + 0,44 \tag{27}$$

$$\theta_{d2,3} = \frac{1,00}{(2,30 + 1,94 * 10^{-9} * \psi^{2,29})} + 4,24 * 10^{-4} \tag{28}$$

Figura 30 – Curva de retenção de água no solo – Ponto 03



Fonte: O autor

Para os valores de sucção de até 80 kPa, as curvas de secagem e umedecimento para o ponto 03 apresentaram a mesma forma e, portanto, igual curva de ajuste. Para valores a partir de 1.500 kPa a curva de secagem resultou em maiores valores de tensão para a mesma umidade, quando comparada com a curva de umedecimento. O fenômeno de histerese ocasionou diferentes valores de entrada de

ar nos microporos, sendo 1.000 kPa para a curva de umedecimento e 3.000 kPa para a curva de secagem.

O ponto 04 amostrado apresentou a menor porosidade, de 0,40, sendo classificado como um solo residual arenoso. O ajuste dos dados foi realizado para dois intervalos diferentes em cada curva. Entre os valores de sucção de 0 a 40 kPa, a curva de umedecimento foi representada pela equação (29), e para valores de tensão maiores que 40 kPa, o ajuste foi dado através da equação (30):

$$\theta_{w1,4} = \frac{1,00}{(14,50 + 0,09 * \psi^{1,76})} + 0,33 \quad (29)$$

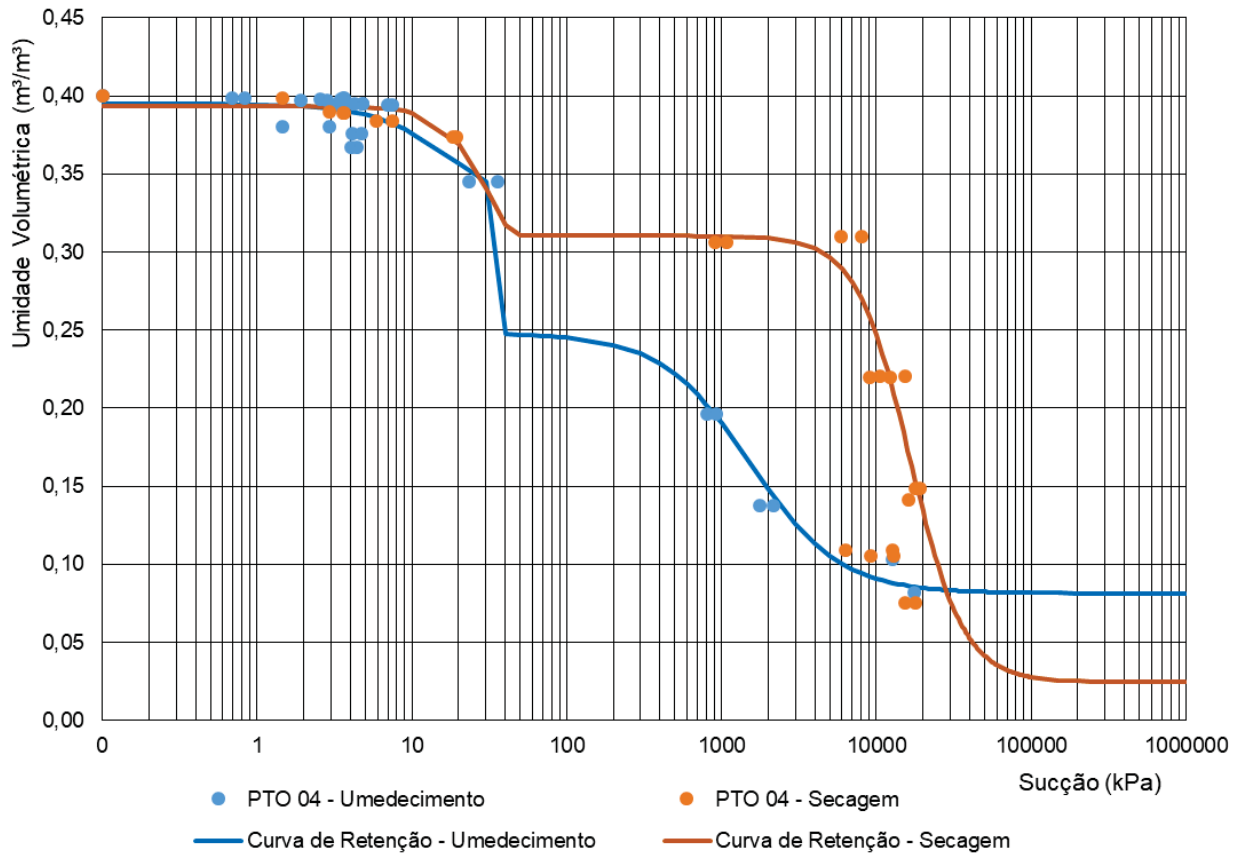
$$\theta_{w2,4} = \frac{1,00}{(6,00 + 10^{-4} * \psi^{1,50})} + 0,08 \quad (30)$$

A partir da sucção de 40 kPa, a curva de secagem apresentou comportamento bastante distinto da curva de umedecimento para as amostras do ponto 04. A maior influência da histerese foi registrada para os solos arenosos, quando comparado com os outros pontos amostrados. A equação (31) foi utilizada para o ajuste dos pontos da curva de secagem com sucção entre 0 e 40 kPa, enquanto a equação (32) foi utilizada para valores maiores que 40 kPa.

$$\theta_{d1,4} = \frac{1,00}{(8,68 + 3,80 * 10^{-4} * \psi^{2,90})} + 0,28 \quad (31)$$

$$\theta_{d2,4} = \frac{1,00}{(3,50 + 10^{-10} * \psi^{2,50})} + 0,02 \quad (32)$$

Figura 31 – Curva de retenção de água no solo – Ponto 04



Fonte: O autor

Quando comparado as duas curvas obtidas, o ponto 04 apresentou considerável diferença de valores de sucção para umidades menores que 31%. O valor de pressão de entrada de ar nos microporos para a curva de umedecimento foi de 300 kPa, enquanto que para a curva de secagem foi de 6.000 kPa. O teor de umidade residual dos macroporos também foi diferenciado entre as curvas, sendo cerca de 24% para a curva de umedecimento e de 32% para a curva de secagem.

O último local amostrado foi o ponto 05, o qual foi caracterizado como um solo coluvionar. Tanto para o processo de umedecimento quanto o de secagem, os patamares das curvas foram definidos para sucções de 0 a 20 kPa, e valores de tensão maiores que 20 kPa. Portanto, para o ensaio de umedecimento, a equação (33) ajusta os dados de 0 a 20 kPa e a equação (34) para valores superiores. Já para a curva de secagem, as equações (35) e (36) representam os intervalos de 0 a 20 kPa e maior que 20 kPa, respectivamente:

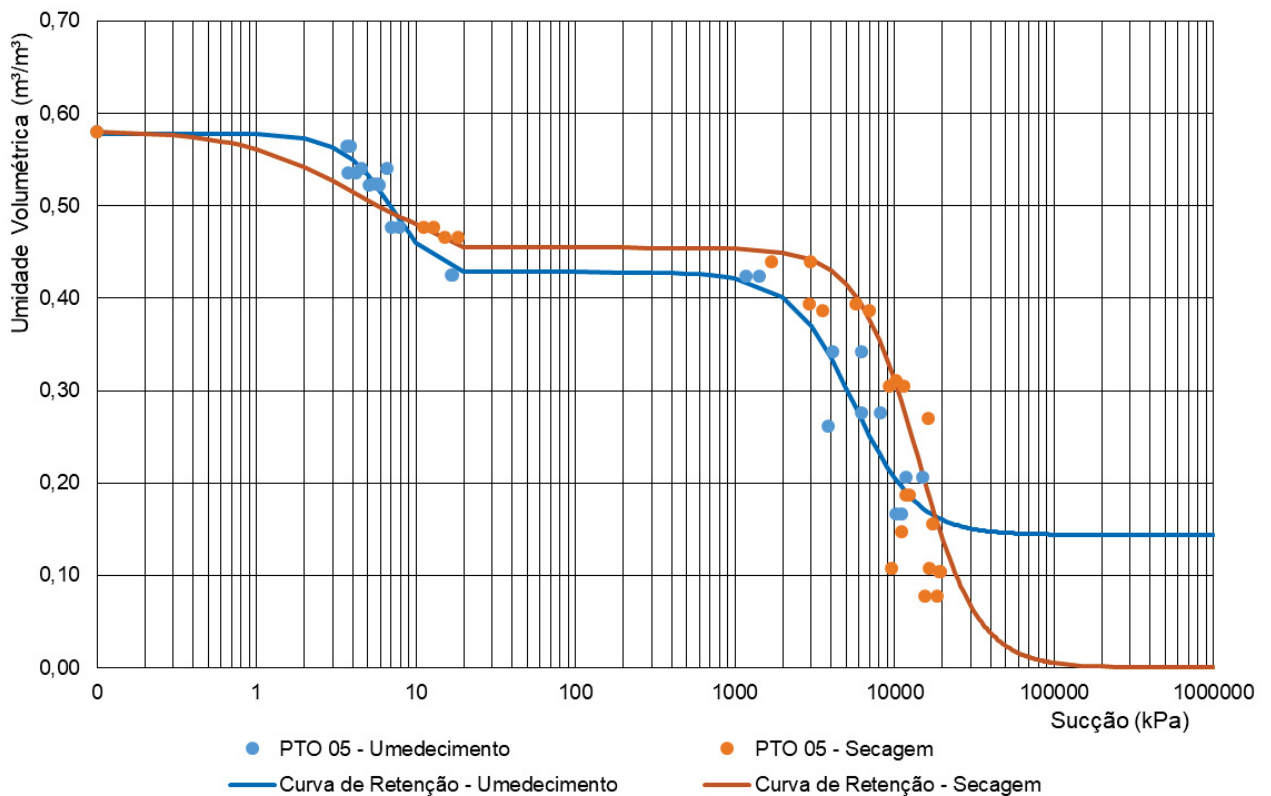
$$\theta_{w1,5} = \frac{1,00}{(5,80 + 0,03 * \psi^{2,61})} + 0,41 \quad (33)$$

$$\theta_{w2,5} = \frac{1,00}{(3,52 + 2,28 * 10^{-8} * \psi^{2,19})} + 0,14 \quad (34)$$

$$\theta_{d1,5} = \frac{1,00}{(7,47 + 1,31 * \psi^{1,24})} + 0,45 \quad (35)$$

$$\theta_{d2,5} = \frac{1,00}{(2,20 + 7,00 * 10^{-10} * \psi^{2,29})} + 4,24 * 10^{-4} \quad (36)$$

Figura 32 – Curva de retenção de água no solo – Ponto 05



Fonte: O autor

De uma maneira geral, os pontos 03 e 05, caracterizados como coluvionares, foram os que apresentaram as menores diferenças entre as curvas de secagem e

umedecimento, ou seja, a menor histerese. No ponto 05, a pressão de entrada de ar dos microporos para a curva de umedecimento foi de 2.000 kPa, e para a curva de secagem foi de 4.500 kPa. Já a umidade residual dos macroporos foi similar, sendo de aproximadamente 43% para a curva de umedecimento e de 46% para a curva de secagem.

Para aplicação no modelo computacional proposto, optou-se por agrupar os pontos de ensaios entre os solos residuais (Figura 33) e solos coluvionares (Figura 34), visto que serão tratados desta forma no perfil estratigráfico. Os pontos 01, 02 e 04 foram classificados como residuais e apresentaram porosidade média de 49,3%. Os resultados dos três pontos ensaiados mostraram certa dispersão entre si, principalmente para os dados de sucção entre 0 e 10 kPa. A curva de umedecimento que ajusta todos os dados do solo residual foi representada pela equação (37), para o intervalo de 0 a 5 kPa, e pela equação (38) para valores de sucção acima de 5 kPa.

$$\theta_{w1,r} = \frac{1,00}{(5,00 + 10^{-3} * \psi^{5,00})} + 0,29 \quad (37)$$

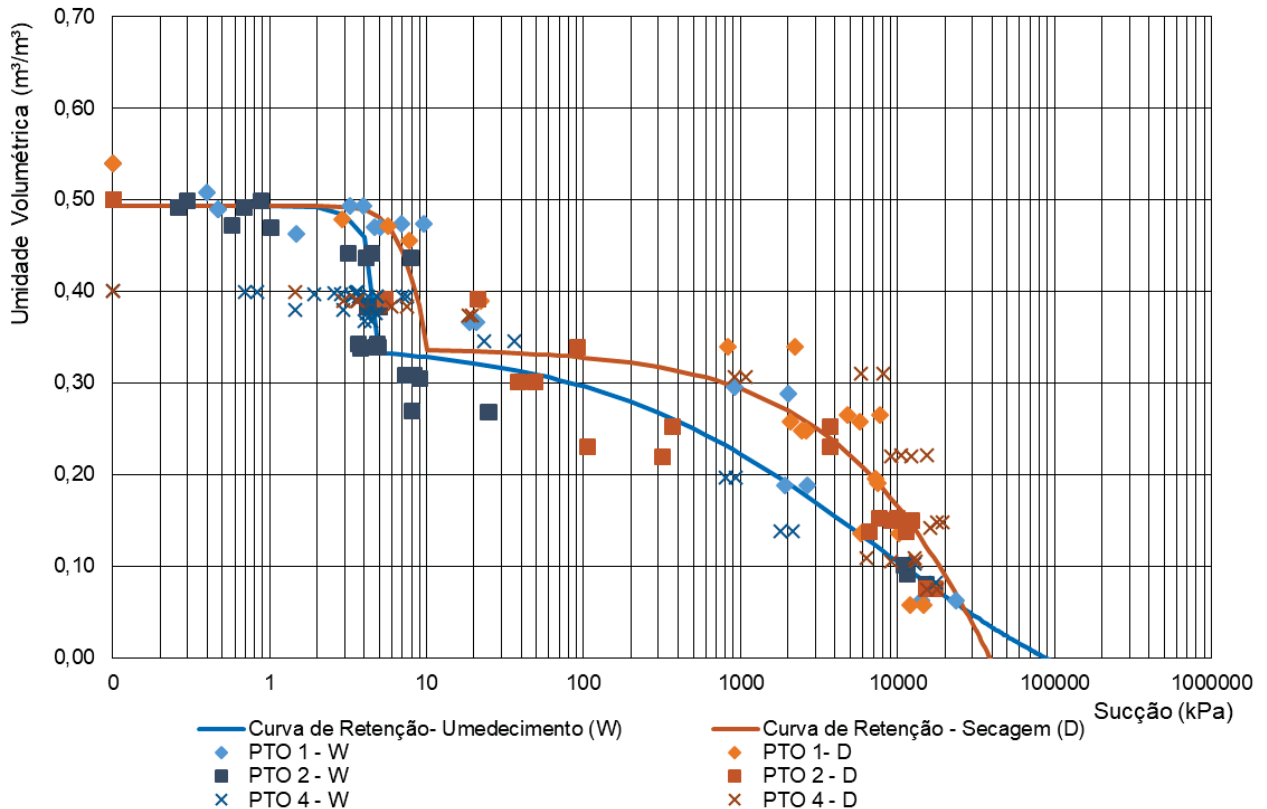
$$\theta_{w2,r} = \frac{1,00}{(2,23 + 0,03 * \psi^{0,49})} - 0,10 \quad (38)$$

Até a sucção de 5 kPa, as curvas de secagem e umedecimento apresentaram comportamento bem semelhante. Para o ajuste da curva de secagem, referente aos dados do solo residual, a equação (39) foi utilizada para valores de sucção entre 0 e 10 kPa. Para valores superiores à 10 kPa, a equação (40) apresentou melhor ajuste aos dados experimentais do solo residual.

$$\theta_{d1,r} = \frac{1,00}{(5,00 + 10^{-4} * \psi^{5,00})} + 0,29 \quad (39)$$

$$\theta_{d2,r} = \frac{1,00}{(0,97 + 4,72 * 10^{-4} * \psi^{0,65})} - 0,69 \quad (40)$$

Figura 33 – Curva de retenção de água no solo – Solo Residual



Fonte: O autor

Dos três pontos de solo residual ensaiados, os resultados do ponto 04 apresentaram maior dispersão quando comparado aos outros dois, fato que pode ser explicado devido à composição granulométrica deste ponto ser mais grossa, com 42,84% de areia. As equações apresentaram bom ajuste aos dados, com pressões de entrada de ar nos macroporos de 3,3 e 5,5 kPa, para as curvas de umedecimento e secagem, respectivamente. O teor de umidade residual dos macroporos para ambas as curvas foi de aproximadamente 32%. Como já observado nos outros pontos, o fenômeno de histerese foi mais representativo no caso de sucções mais altas. Deste modo, observou-se que a pressão de entrada de ar dos microporos foi de aproximadamente 100 kPa para a curva de umedecimento e de 800 kPa para a curva de secagem.

Os resultados dos pontos 03 e 05 foram plotados em conjunto para obtenção da curva de retenção de água no solo representativa do solo coluvionar. Os dois patamares apresentados pelas curvas de umedecimento e secagem variaram entre 0 e 10 kPa, e para valores superiores à 10 kPa. Isto posto, a equação (41) representa a

curva de umedecimento para valores de sucção entre 0 e 10 kPa, e a equação (42) para valores superiores à 10 kPa.

$$\theta_{w1,c} = \frac{1,00}{(10,13 + 7,94 * 10^{-4} * \psi^{4,82})} + 0,46 \quad (41)$$

$$\theta_{w2,c} = \frac{1,00}{(2,27 + 1,94 * 10^{-8} * \psi^{2,11})} + 0,01 \quad (42)$$

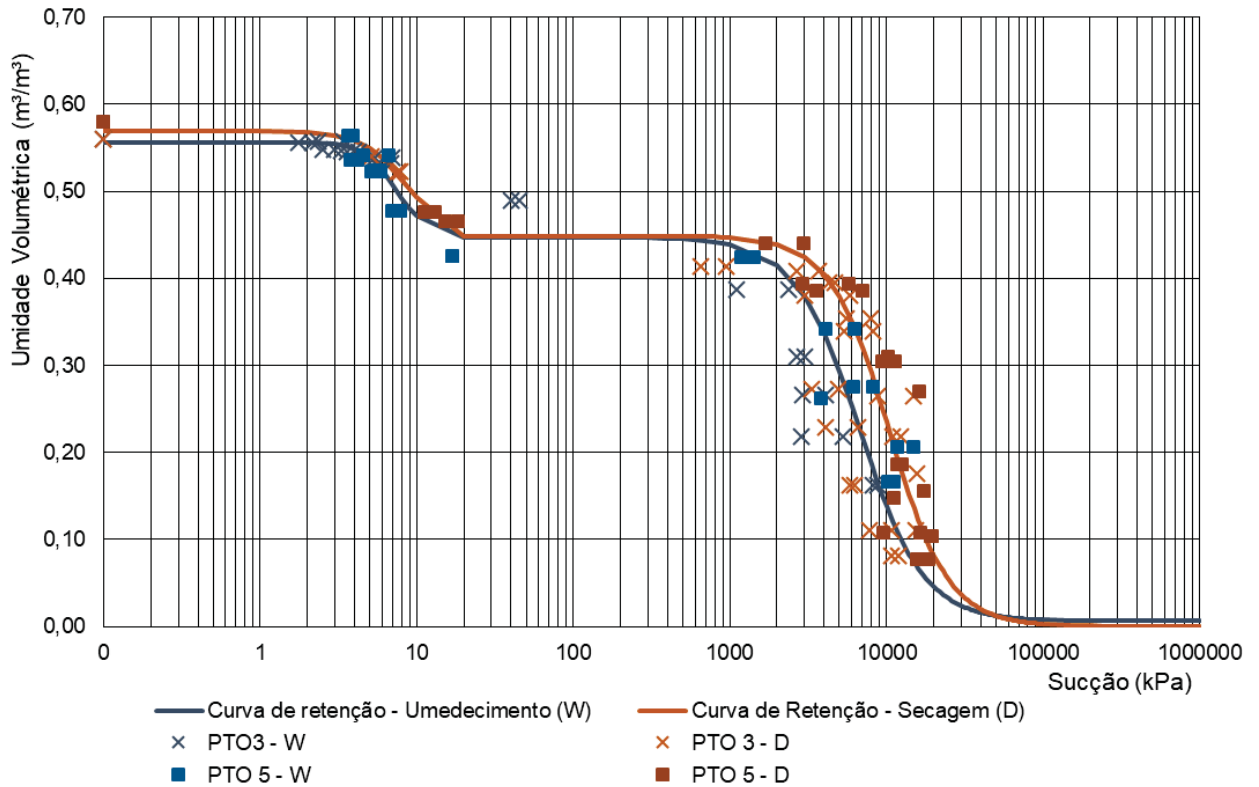
Os valores de retenção para o solo coluvionar apresentaram pouca dispersão entre os dois pontos, resultando em equações com ótimo ajuste aos dados ensaiados. Os pontos experimentais da curva de secagem foram ajustados por meio da equação (43), para valores entre 0 e 10 kPa, enquanto a equação (44) representa a curva de retenção de água no solo para valores de sucção acima de 10 kPa. A seguir estão apresentadas as equações representativas da curva de secagem do solo coluvionar, de acordo com os pontos amostrados.

$$\theta_{d1,c} = \frac{1,00}{(8,74 + 0,01 * \psi^{3,25})} + 0,45 \quad (43)$$

$$\theta_{d2,c} = \frac{1,00}{(2,23 + 1,39 * 10^{-9} * \psi^{2,29})} + 4,24 * 10^{-4} \quad (44)$$

O teor de umidade residual dos macroporos para o solo coluvionar foi o mesmo para as curvas de secagem e umedecimento, sendo definidos como 42,5%. A pressão de entrada de ar dos microporos para a curva de umedecimento foi de 2.200 kPa, enquanto que para a de secagem foi de 3.500 kPa. Logo, o fenômeno de histerese ocorreu para valores de sucção acima de 1.000 kPa, apresentando menor valor para uma mesma umidade, quando comparado com o solo residual. Por fim, o teor de umidade residual dos microporos foi aproximadamente zero para as duas curvas, de secagem e umedecimento.

Figura 34 – Curva de retenção de água no solo – Solo Coluvionar



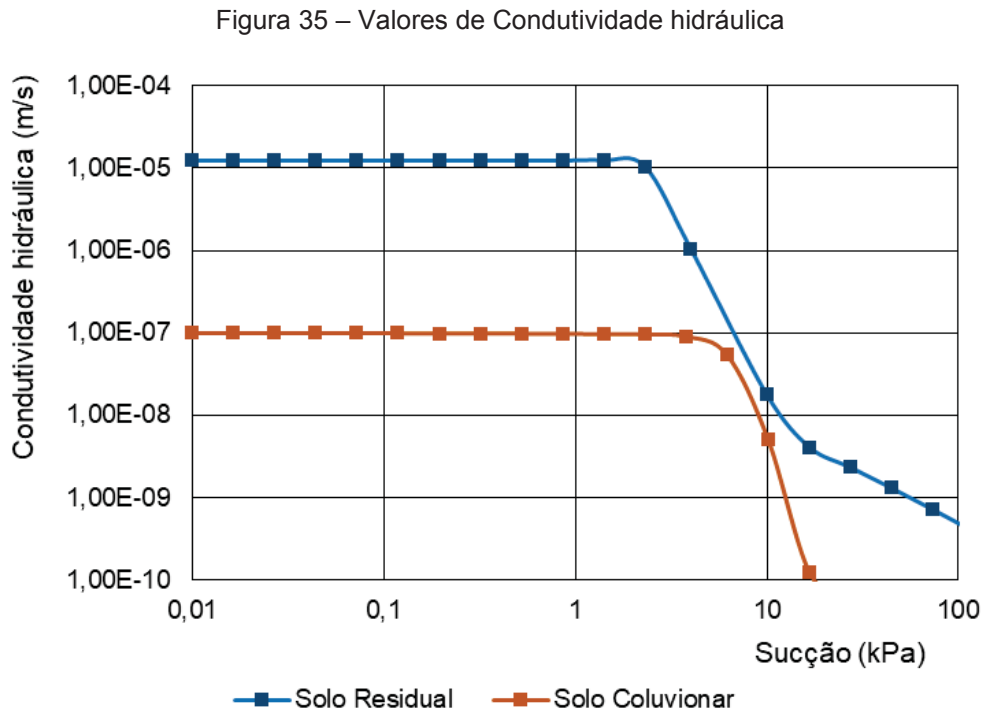
Fonte: O autor

A curva de retenção de água no solo permite determinar os teores de umidade residuais e as pressões de entrada de ar para cada tipo de poro. Todos os solos estudados apresentaram formato bimodal, caracterizando a presença de macroporos e microporos. Quando comparados os valores de umidade residual dos macroporos entre o solo residual (32%) e o coluvionar (42,5%), o primeiro resulta no menor valor. Ou seja, o solo residual apresenta granulometria mais grossa e poros maiores, o que resulta na maior facilidade de liberar a água retida nos macroporos do solo.

5.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Em solos saturados, considera-se a permeabilidade saturada como um valor constante, visto que o teor de umidade não varia. Em condição de não saturação, o coeficiente de condutividade hidráulica varia de acordo com o índice de vazios e o teor de umidade apresentado pelo solo. Deste modo, foi determinado a função de condutividade hidráulica do solo residual e coluvionar a partir do coeficiente de permeabilidade saturada e da curva de retenção de água no solo de umedecimento

correspondente a cada tipo de solo. A formulação utilizada para estimar tal parâmetro foi a proposta por FREDLUND *et al.* (1994), e está apresentada na Tabela 3. O resultado obtido está apresentado na Figura 35.



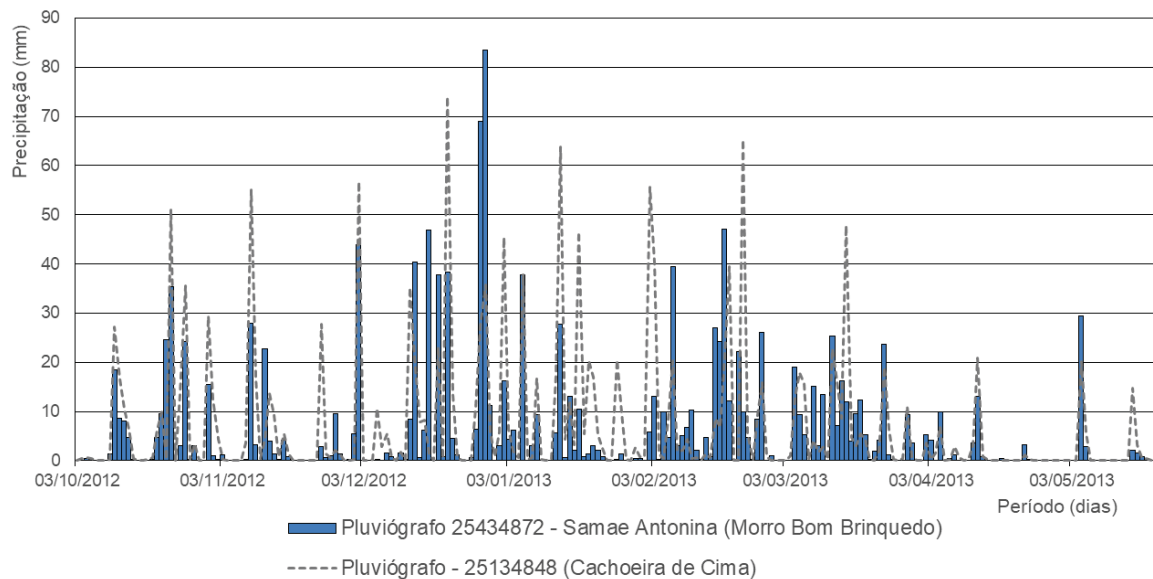
Fonte: O autor

5.4 ANÁLISE DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS

O entendimento da dinâmica pluviométrica de determinada região pode auxiliar no monitoramento e previsão de movimentos gravitacionais de massa, visto que os eventos de chuva costumam ser o principal deflagrador do movimento de terra. Para tanto, faz-se necessário compreender a relação da intensidade, duração e volume de chuvas máximas acumuladas, para então analisar e relacionar com a probabilidade de ocorrência de deslizamentos.

Neste trabalho, foi utilizada as séries de dados de dois pluviógrafos da cidade de Antonina, como explicado no subitem 4.1.3. A fins de comparação entre os dados registrados por ambos, a Figura 36 apresenta a precipitação diária das duas estações, no qual foi plotado o intervalo de tempo correspondente às leituras dos tensiômetro instalados no Morro do Bom Brinquedo.

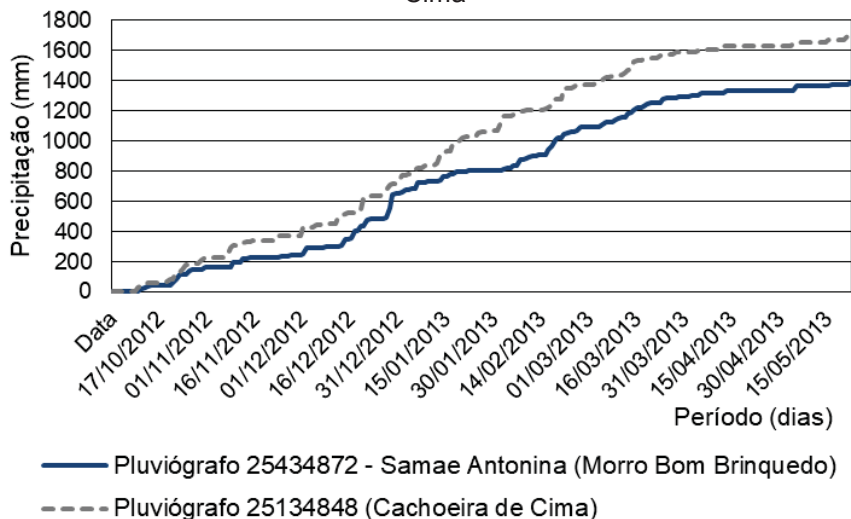
Figura 36 – Comparação da precipitação entre os pluviômetros do Morro do Bom Brinquedo e de Cachoeira de Cima



Fonte: O autor

Na maioria dos casos, o pluviômetro de Cachoeira de Cima apresentou acumulados diários levemente superiores àqueles referentes ao equipamento Samae Antonina instalado no Morro do Bom Brinquedo. Por isso, foi usado somente os dados do pluviômetro Samae Antonina do Morro do Bom Brinquedo na análise da sucção registrada pelos tensiômetros e na análise da frente de umedecimento, uma vez que este pluviômetro está instalado no morro em estudo. Em complemento, a Figura 37 apresenta os dados acumulados de precipitação dos dois pluviômetros e para o mesmo período de tempo:

Figura 37 – Dados acumulados dos pluviômetros do Morro do Bom Brinquedo e de Cachoeira de Cima

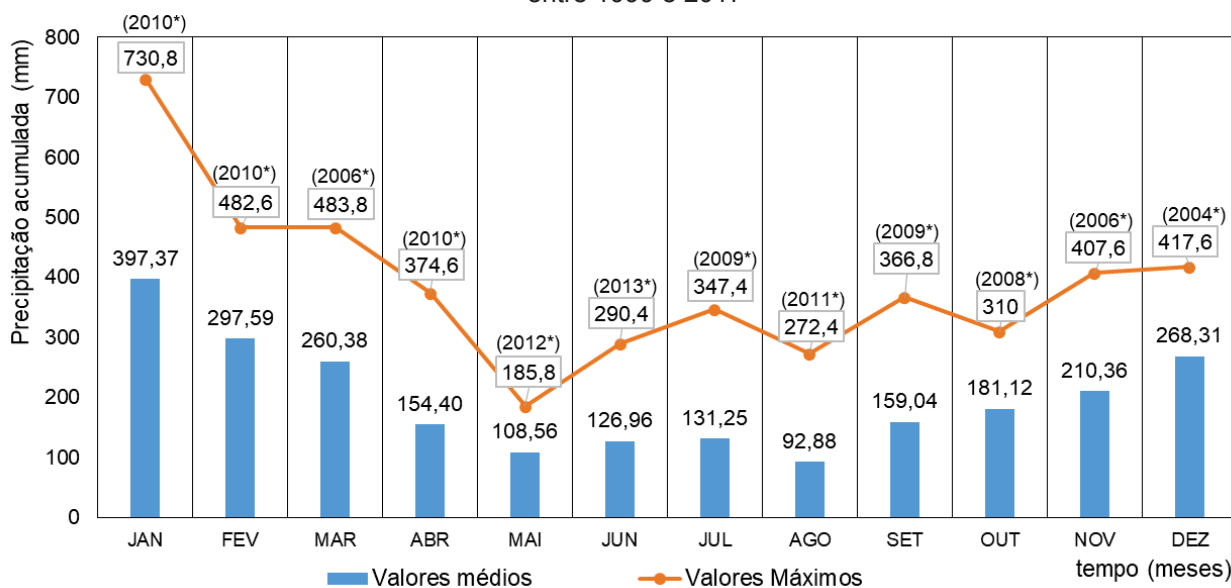


Fonte: O autor

Apesar do pluviógrafo de Cachoeira de Cima apresentar maior precipitação acumulada, ambos os equipamentos tiveram a mesma tendência de crescimento, na maioria dos casos. Ou seja, os equipamentos apresentam regimes de chuva semelhantes, porém com intensidades diferentes, o que pode ser justificado pela diferença de altitude e posicionamento geográfico. Visto que o pluviógrafo do morro em estudo teve seu início de funcionamento em maio de 2012, foi utilizado o equipamento de Cachoeira de Cima para complementar os dados e formar maior série amostral na análise estatística e da curva IDF.

Para o entendimento da dinâmica pluviométrica da região, foram plotados na Figura 38 os valores máximos e médios dos acumulados mensais entre os anos de 1999 e 2017, para o município de Antonina. De acordo com o intervalo amostral, nota-se que a maior precipitação mensal já obtida para essa região foi em janeiro de 2010, que apresentou um acumulado de 730,80 mm no mês. A precipitação média anual para toda a série amostral estudada é de 1.914 mm.

Figura 38 – Valores médios e máximos das precipitações mensais das séries históricas de Antonina, entre 1999 e 2017



(*) Referem-se aos anos de ocorrência da precipitação máxima mensal.

Fonte: O autor

O mês que apresentou o menor valor médio de precipitação foi agosto, com 92,88 mm/mês, mas com valor de precipitação máxima de 272,40 mm no ano de 2011. O mês de maio apresentou o menor valor de precipitação máxima mensal, de 185,80 mm, juntamente com um dos menores valores de precipitação média mensal,

apresentando a marca de 108,56 mm. De maneira geral, entre os meses de abril e setembro, a precipitação média acumulada manteve-se entre 100 e 150 mm por mês. No período da primavera (23 de setembro a 22 de dezembro), os acumulados médios mensais sobem em relação aos períodos de outono e inverno.

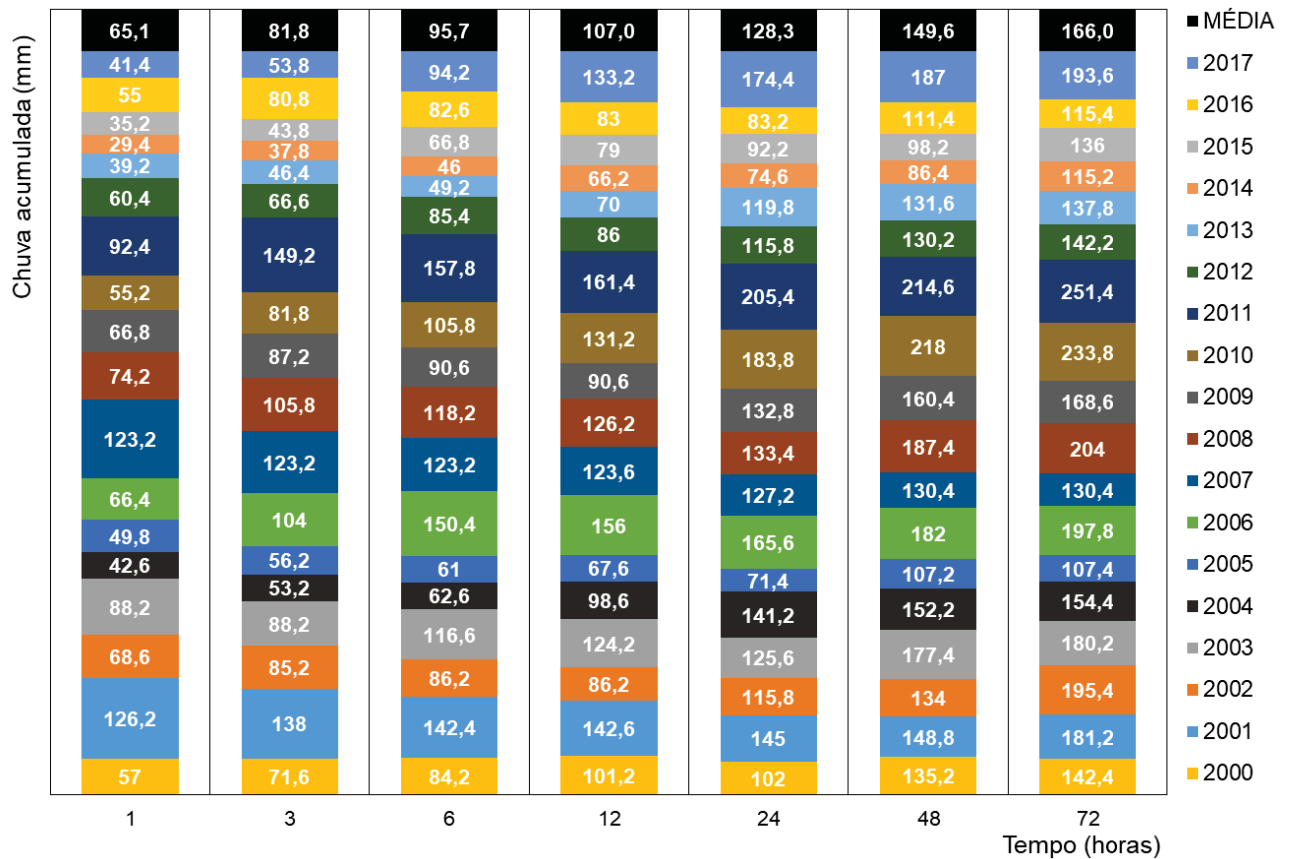
Ainda de acordo com a Figura 38, constatou-se que os meses de janeiro, fevereiro, dezembro e março, nessa ordem, apresentaram os maiores valores médios de precipitação mensais. Em relação aos valores máximos, constatou-se que os quatro meses de maior ocorrência foram janeiro, março, fevereiro e dezembro, em ordem decrescente. Portanto, a incidência de chuvas com maiores intensidades se concentra, em sua maioria, na estação de verão, sendo considerado o período crítico de chuvas na cidade de Antonina, pois podem apresentar riscos quanto a ocorrência de movimentos de massa.

5.4.1 Curva IDF

Para aplicação na modelagem numérica, foi necessário a determinação do regime de chuvas a ser analisado, pois esse dado foi traduzido em taxa de infiltração no solo. Estipulou-se como metodologia a utilização de cenários máximos de pluviometria obtidos por meio de equações IDF (Intensidade, duração e frequência). Para tanto, obteve-se da série histórica os valores máximos das precipitações anuais, para tempos de duração da chuva entre 01 e 72 horas, de acordo com a Figura 39.

A precipitação máxima pode ser entendida como a ocorrência extrema que apresenta determinada duração, distribuição temporal e espacial para a área em estudo. De acordo com o tempo de duração considerado para as precipitações, os máximos registrados para o acumulado de chuva de 72 horas foram 251,40 e 233,80 mm/72 horas, nos anos de 2011 e 2010, respectivamente. Conclui-se também que no ano de 2011 ocorreu pelo menos um evento extremo, visto que, com exceção do acumulado de 1 hora, em todos os outros períodos de duração da chuva o valor máximo registrado foi nesse ano. Deste modo, nota-se que esse evento extremo foi caracterizado por uma precipitação intensa com tempo de duração maior que 1 hora. Resguardada as devidas proporções, nos anos de 2006, 2008, 2009, 2010 e 2017 também ocorreram ao menos um evento extremo em cada ano, caracterizados por grandes intensidades com longo período de duração.

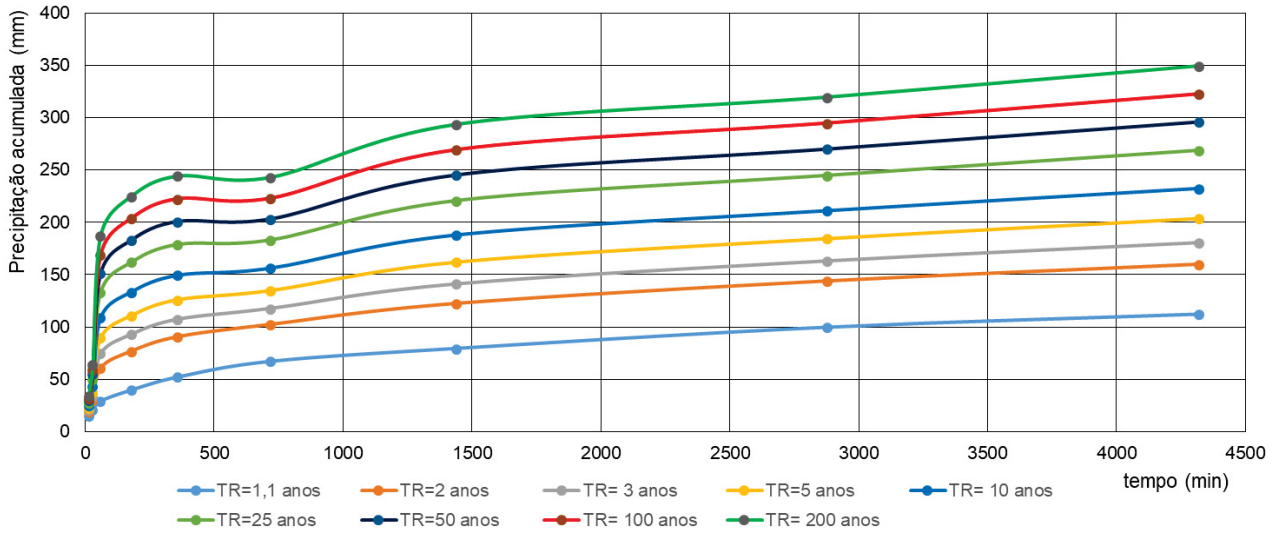
Figura 39 – Máximas precipitações anuais para cada tempo de duração (t)



Fonte: O autor

Após, foi aplicado as equações de distribuição de Gumbel, as quais resultaram nas curvas de precipitação acumulada *versus* duração da chuva para cada Tempo de Retorno (T_R) estudado. A Figura 40 apresenta os referidos valores de precipitação máxima acumulada.

Para chuvas de curta duração, de até 3 horas, a série apresentou grandes alturas pluviométricas acumuladas, e para todos os períodos de retorno. De 3 até 6 horas, o acumulado da precipitação não resultou em grandes variações nas quantidades acumuladas. Para chuvas de grande duração, acima de 12 horas, o gráfico apresentou acumulados mais uniformes, em todos os T_R analisados.

Figura 40 – Precipitação máxima acumulada para cada Tempo de Retorno (T_R)

Fonte: O autor

De posse destes dados, foi convertido os dados acumulados de precipitações para valores de intensidade pluviométrica, em mm/hora, a fim de formar as curvas IDF, apresentadas na Figura 41. A equação (45) apresenta os parâmetros que melhor se ajustaram aos dados locais da série pluviométrica amostral, obtidas pela distribuição de Gumbel. Esta equação sintetiza a família de curvas obtidas pelas relações IDF, para o Morro do Bom Brinquedo em Antonina.

$$i = \frac{6244 * T_R^{0,171}}{(t + 70)^{0,999}} \quad (45)$$

Onde:

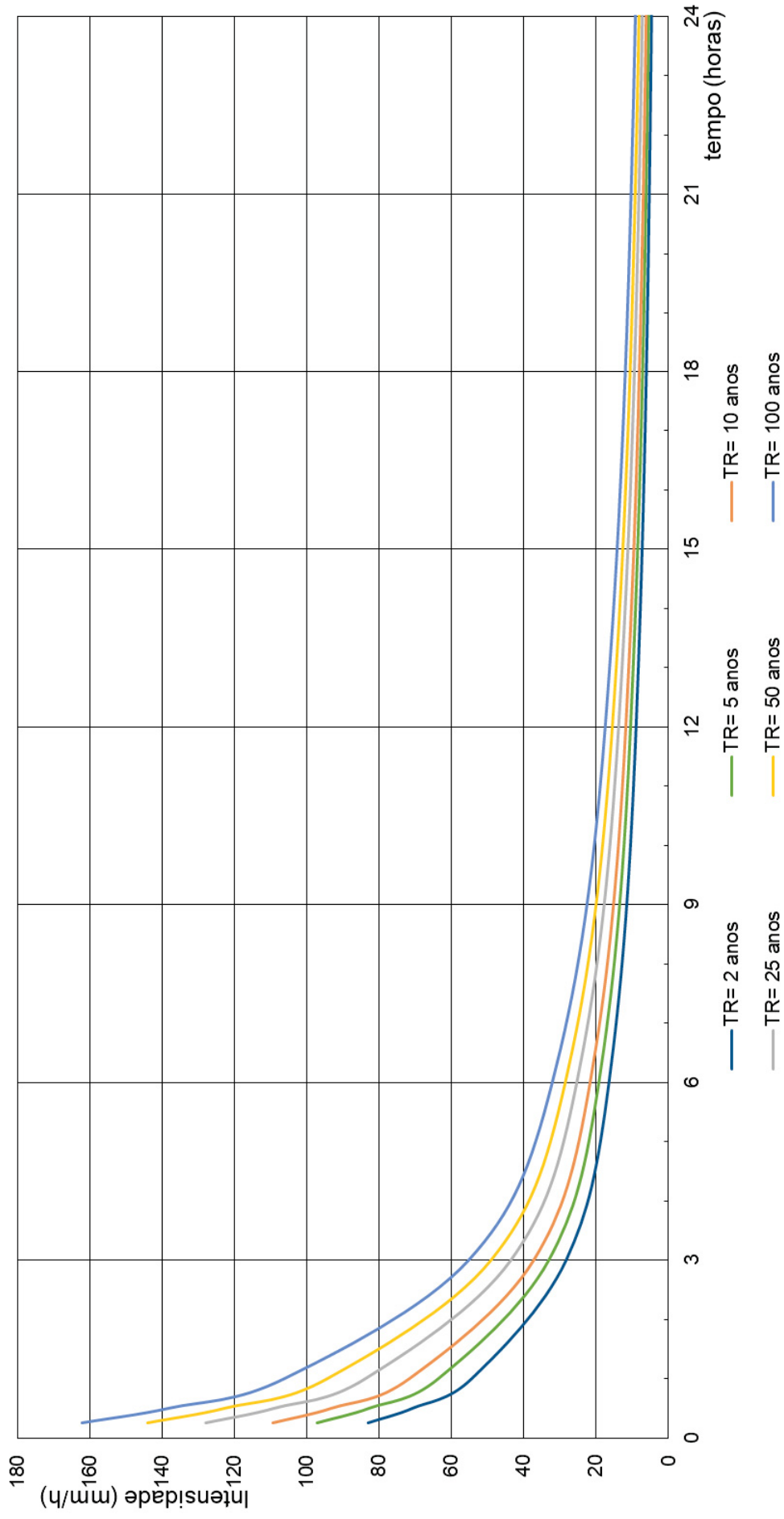
i = Intensidade pluviométrica máxima, em mm/h;

T_R = Tempo de Retorno, em anos e

t = tempo de duração do evento pluviométrico, em minutos.

A equação foi obtida tendo-se como base a utilização de diferentes durações, que variam de 1 a 72 horas, além de serem empregados valores significativos de tempo de retorno (1,1; 2; 5; 10; 25; 50; 100 e 200 anos). Dado este fato, a equação determinada possui uma grande faixa de aplicação, e foi empregada na estimativa da precipitação para os eventos pluviométricos na modelagem numérica. O ajuste dos dados à equação (45) apresentou um erro absoluto médio de 1,52 mm/h, quando comparado com os dados obtidos pela distribuição de Gumbel.

Figura 41 – Curvas IDF para o município de Antonina, em função do período de retorno

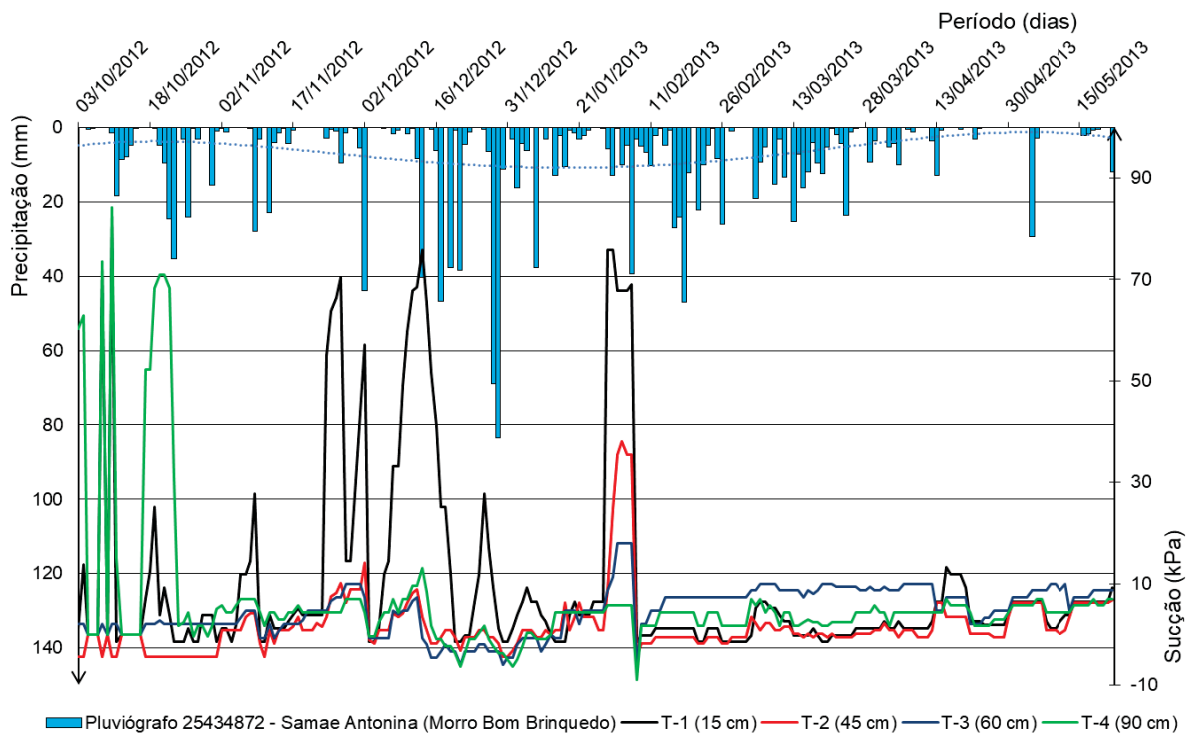


Fonte: O autor

5.5 ANÁLISE INTEGRADA

A série de dados dos tensiômetros da região em estudo, correspondem às profundidades de 15, 45, 60 e 90 cm, os quais foram utilizados para o estudo do início da infiltração devido à variação pluviométrica e para a análise da recarga na zona não saturada da frente de umedecimento. Ao combinar os dados dos tensiômetros com os obtidos em ensaios de sucção em laboratório, estuda-se a influência dos macroporos e microporos sobre a dinâmica do fluxo da água no solo. A Figura 42 apresenta todo o período de obtenção de dados dos tensiômetros no morro em estudo, o qual foi plotado em comparação com o período de chuvas. Neste gráfico, a sucção (poro pressão negativa) está representada como valores positivos.

Figura 42 – Série histórica tensiômetros *versus* precipitação



Fonte: O autor

Através da análise da série histórica, os dados dos tensiômetros foram considerados inconsistentes em alguns pontos, com erros advindos de procedimentos de leituras ou mesmo falta de manutenção do equipamento. Portanto, para a análise integrada foi utilizado o intervalo entre 17/10/12 e 08/02/13, período no qual foi considerado que o equipamento teve um funcionamento adequado. Em relação ao

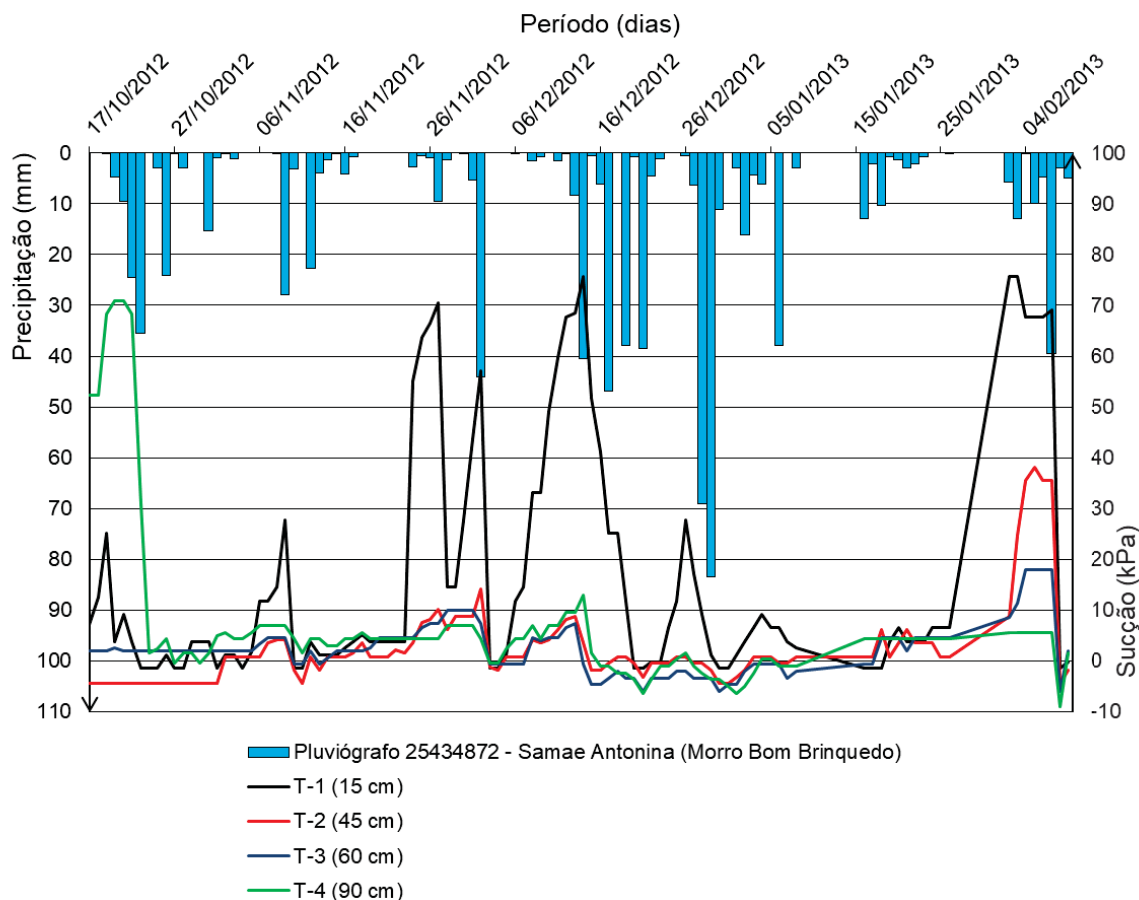
período final, foi considerado que não foi feita a correta manutenção do equipamento, ocasionando leituras com comportamentos suspeitos, e por isso foram descartadas nesta pesquisa.

A manutenção que provavelmente não foi realizada, corresponde ao processo de retirar o ar que porventura fica preso na parte superior do tensiômetro devido aos ciclos de umedecimento e secagem, e substituí-lo por água. Caso não seja feito este trabalho, os valores das leituras podem ficar abaixo dos valores reais de tensão, similar à situação que foi apresentada na série estudada. Para o começo da série de dados, atribuiu-se os erros aos ajustes iniciais do equipamento em campo e à adequação do leitorista.

5.5.1 Análise da série de dados do Tensiômetro frente à variação pluviométrica

Para analisar o comportamento do solo na condição não saturada, deve-se buscar compreender a distribuição, retenção e liberação da água nas diversas situações às quais o solo pode estar sujeito. Sabe-se que essas situações podem ser de ordem mecânica ou ambiental, nas quais a água move-se para dentro ou para fora do solo por alteração no estado de tensão externo, e/ou por questões ambientais como a infiltração e evaporação. Aqui, desconsiderou-se o efeito da vegetação, da evaporação e do *run-off* fazendo, portanto, uma relação direta entre a infiltração e os eventos pluviométricos. Para analisar qual a variação da sucção com a chuva, plotou-se o intervalo em bom funcionamento da série amostral dos tensiômetros, em comparação com a precipitação diária ocorrida no pluviógrafo instalado no Morro do Bom Brinquedo, de acordo com a Figura 43.

Para facilitar a comparação com os dados de chuva, na Figura 43 a sucção (poro pressão negativa) está representada como valores positivos. Entre os dias 17 e 27 de outubro de 2012 a maior profundidade, de 90 cm, apresentou altos valores de sucção. O pico foi registrado nos dias 21 e 22 de outubro, com a sucção chegando a 70,94 kPa, sendo que nos quatro dias anteriores não houve registros de chuva. Após, nas próximas 48 horas, houve um acumulado de 60 mm, que resultou numa sucção de 1,66 kPa na profundidade de 90 cm. Considerando-se que as camadas superiores apresentavam níveis de sucção inferiores antes do evento de 48 horas, – estando as profundidades de 45 e 60 cm quase saturadas – após a chuva, a frente de umedecimento rapidamente progrediu e quase saturou a camada mais profunda.

Figura 43 – Dados tensiômetro *versus* precipitação no período de 17/10/12 a 08/02/13

Fonte: O autor

Com o início de dezembro e a ocorrência de temperaturas mais elevadas, a profundidade de 15 cm apresentou grande variação ao longo da série histórica, apresentando diversas vezes valores elevados de sucção (nos intervalos em que ocorreram precipitações de baixa intensidade ou nulas). De uma maneira geral, as profundidades de 45 e 60 cm apresentaram valores similares de sucção, ao longo do tempo. A saturação de todas as camadas foi registrada somente em chuvas extremas com altos acumulados de até 72 horas antecedentes. Como exemplo disso, pode-se citar o evento de 28 e 29 de dezembro, que registraram 69 e 83,40 mm/dia, respectivamente, ocasionando a saturação das quatro profundidades medidas.

Entre o período de 15/12/2012 e 08/01/2013, as profundidades de 45, 60 e 90 cm mantiveram-se praticamente todo o tempo saturadas, fato que pode ser explicado pela alta incidência de chuvas, que apresentou nesses 25 dias um acumulado de 377,60 mm, o que representa a ocorrência de uma chuva de alta intensidade e longa duração. Nos primeiros dias de fevereiro, houve registros de eventos de chuva fraca

e chuviscos (de no máximo 10 mm/dia), o que ocasionou valores de sucção relativamente altos. Porém, a chuva forte de 40 mm no dia 07/02 foi o suficiente para ocasionar a saturação das quatro profundidades de leitura, de acordo com o valor registrado pelo tensiômetro no dia 08/02 pela manhã. Isto mostra a grande influência de chuvas fortes de curta duração na saturação da camada de solo até 90 centímetros no Morro do Bom Brinquedo em Antonina.

Vale destacar que nos períodos de 09/01/2013 a 15/01/2013 e 27/01/2013 a 02/02/2013 não houveram registros de leituras nos tensiômetros, pois as mesmas foram realizadas em períodos intermitentes. Por isso, também não foram plotados os eventos pluviométricos nesses períodos, para não gerar interpretações errôneas.

5.5.2 Análise da frente de umedecimento

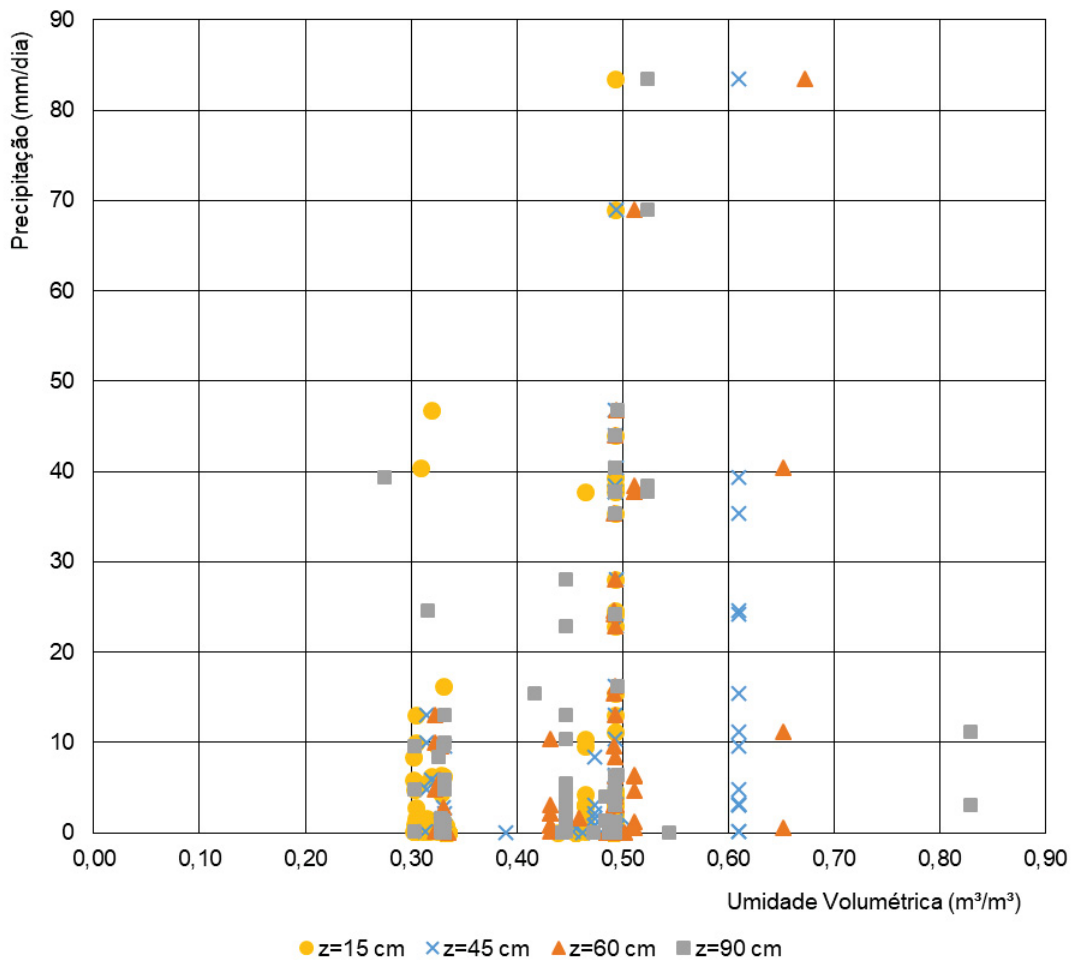
A frente de umedecimento pode ser entendida como uma metodologia simplificada para considerar mudanças na saturação do solo sujeito às condições atmosféricas, como as precipitações. Neste trabalho, para a análise da frente de umedecimento considerou-se a variação da umidade volumétrica - determinada por meio da correlação do valor de poro pressão medida *in situ* e o resultado do ensaio de sucção – nas quatro profundidades medidas e com curvas dependentes do tempo. Para tanto, foram utilizadas as equações (37) e (38) de umedecimento e as equações (39) e (40) de secagem - deduzidas para o solo residual do morro em estudo - provenientes do ensaio de sucção realizado. Para a interpretação dos resultados, foi aplicado as curvas estimadas de umedecimento para os dias em que houve registro de precipitação de pelo menos 24 horas. Em consequência, nos dias em que houve registro pluviométrico nulo, foram utilizadas na interpretação dos resultados as curvas de secagem.

Para a avaliação da variação da sucção e umidade ao longo dos eventos pluviométricos, considerou-se como um período de 24 horas sem registro de precipitação, como o fim de um evento chuvoso. Buscou-se analisar eventos de chuva com longa duração e baixa intensidade, como também eventos de alta intensidade e curta duração, com e sem acumulados de chuvas antecedentes. Como as medidas dos tensiômetros foram realizadas uma vez por dia e no período da manhã – por volta das 8 horas - utilizou-se a chuva acumulada diária do dia anterior à leitura do tensiômetro. Ou seja, para analisar a influência da precipitação na umidade

apresentada pelo solo, a leitura do tensiômetro no dia “n” foi relacionada com o evento pluviométrico do dia “n-1”.

Para analisar as umidades registradas no período de análise deste trabalho, foram plotadas na Figura 44 a síntese de todos os valores medidos, no período de 17/10/2012 a 08/02/13. Os dados de umidade volumétrica correspondem às profundidades de medição de 15, 45, 60 e 90 cm medidas no dia “n”, comparadas com a chuva do dia “n-1”.

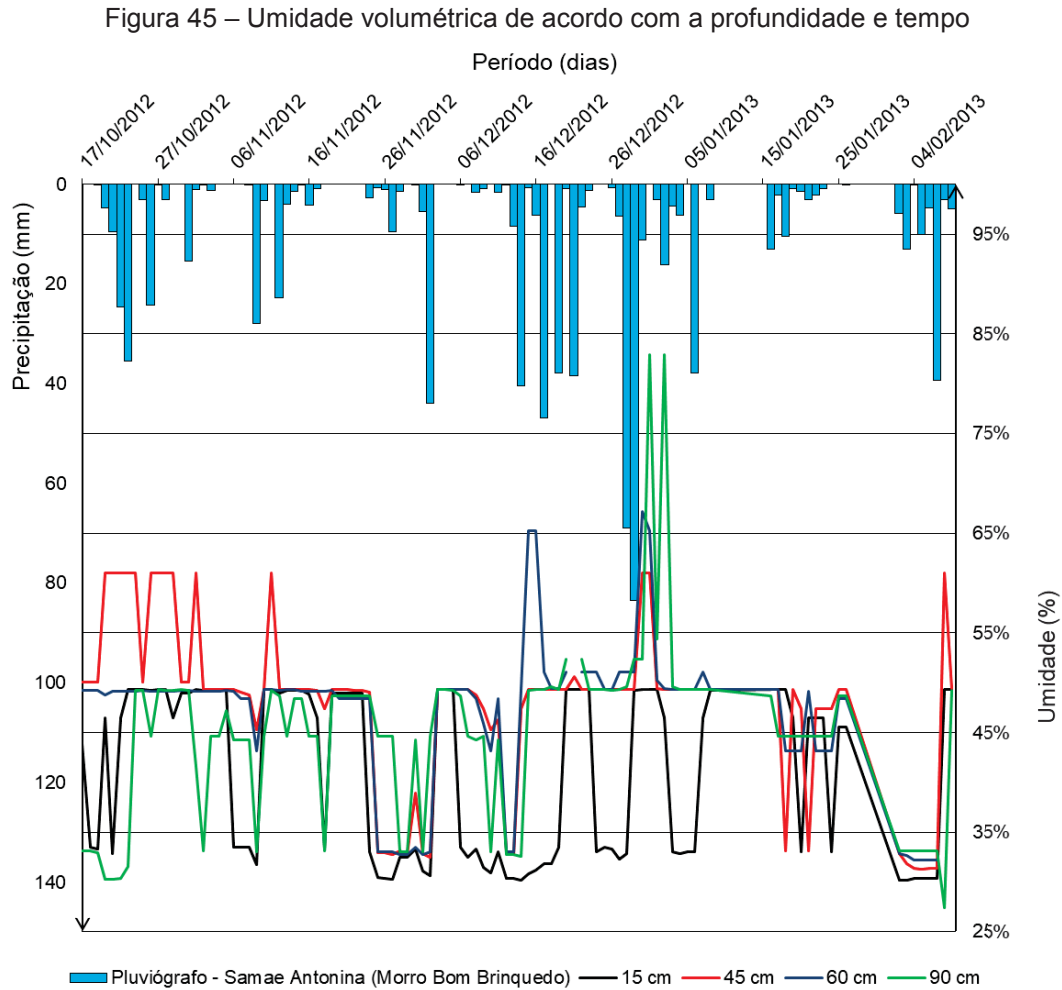
Figura 44 – Umidade volumétrica em relação à chuva “n-1”



Fonte: O autor

Por meio da análise da figura anterior, conclui-se que cerca de 89,2% dos valores de umidade volumétrica, em todas as profundidades estudadas, ficaram entre 30,0 e 50,0%. De acordo com a porosidade média de 0,493 estimada para o solo residual, calcula-se que nesse período cerca de 28,9% das medidas *in situ*

encontravam-se com grau de saturação de 100,0%. Na geotecnia, é comum considerar o solo como saturado a partir do grau de saturação de 85,0%, o que resultaria em aproximadamente 73,0% dos valores medidos sendo considerados como solo saturado. A Figura 45 apresenta a umidade correspondente à série histórica dos tensiômetros instalados, em relação à precipitação ocorrida.



Fonte: O autor

As maiores umidades registradas no período de estudo foram na profundidade de 90 cm e, a princípio, estão associadas a um evento de chuvas de intensidade moderada a extrema, combinado com um período continuado de chuva no qual ocorreu o fluxo transiente para a água percolar até essa profundidade. A maior precipitação registrada no período analisado foi de 83,4 mm/dia, e as maiores umidades registradas na leitura do tensiômetro para esse evento extremo foram nas profundidades de 45 e 60 cm, o que indica que a frente de umedecimento estava se desenvolvendo e ainda não tinha alcançado a profundidade de 90 cm.

Foram selecionados alguns eventos para análise, dentro do intervalo de leitura dos tensiômetros (entre 17/10/2012 e 08/02/2013), a fim de relacionar a variação da umidade no solo com a precipitação ocorrida. Como já analisado em 5.4, o verão e em segundo lugar a primavera, compreendem as épocas com os eventos pluviométricos mais extremos para ocorrência de MGM's no morro em estudo. Isto porque, estatisticamente, ocorre as chuvas de maiores intensidades e durações, quando comparado ao restante do ano. Portanto, justificam-se e validam-se as análises serem concentradas nessas épocas para analisar prováveis cenários de instabilidade.

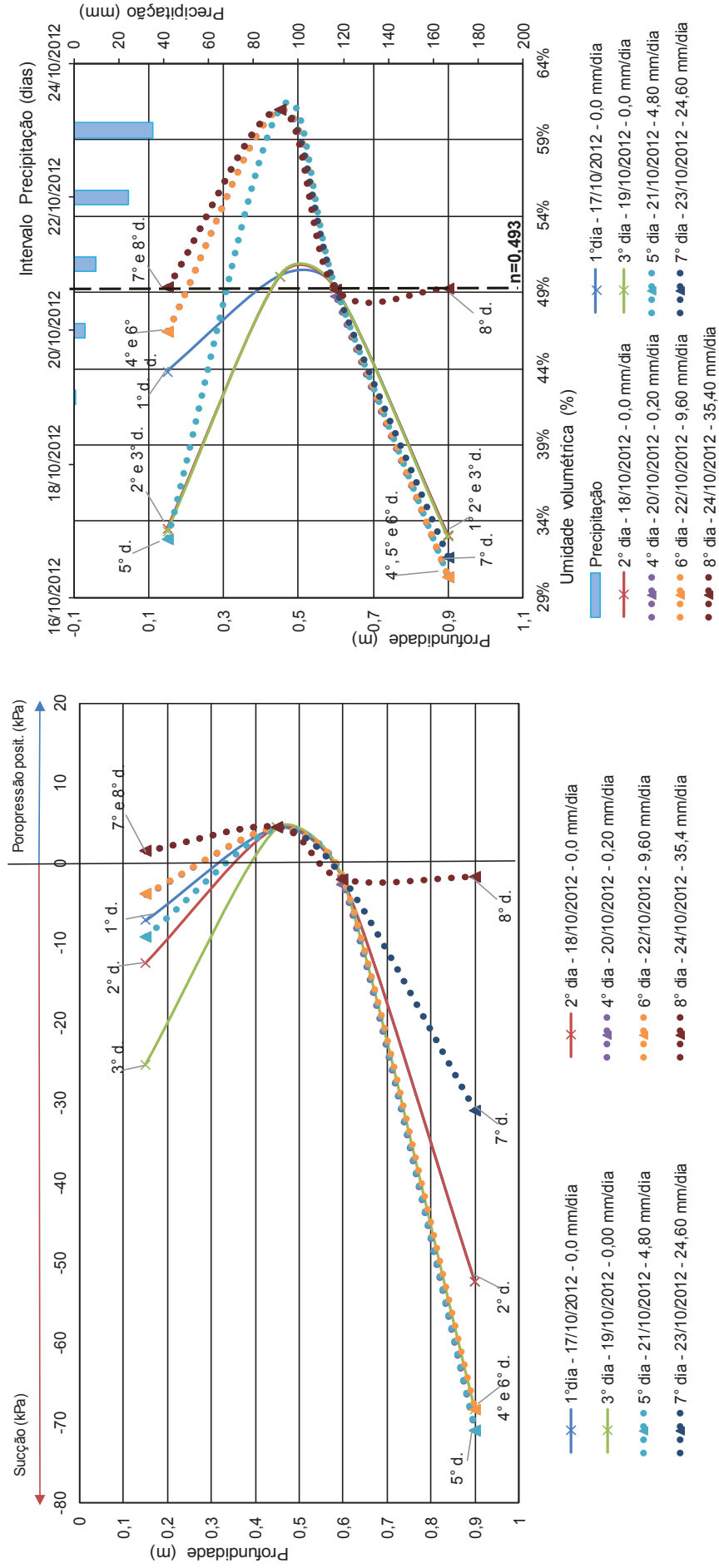
Na Tabela 14 estão sintetizados os dados correspondentes ao evento 1 selecionado, entre os dias 17/10/2012 e 24/10/2012, e que estão correlacionados na Figura 46. Não houve registro de chuva em 72 horas antecedentes ao dia 19.

Tabela 14 – Evento 1 – 17/10/2012 à 24/10/2012

Dia Leitura Tensiômetro	Sucção (-) e Poro pressão (+) (kPa)				Umidade (%)				Chuva (mm/dia)
	T1 15 cm	T2 45 cm	T3 60 cm	T4 90 cm	T1 15 cm	T2 45 cm	T3 60 cm	T4 90 cm	
(n)									(n-1)
1° - 17/10/2012	-7,2	4,5	-2,0	-52,3	43,8	50,1	49,3	33,1	0,0
2° - 18/10/2012	-12,5	4,5	-2,0	-52,3	33,5	50,1	49,3	33,1	0,0
3° - 19/10/2012	-25,1	4,5	-2,0	-68,3	33,4	50,1	49,3	33,0	0,0
4° - 20/10/2012	-3,8	4,5	-2,7	-70,9	46,5	61,0	48,8	30,3	0,2
5° - 21/10/2012	-9,2	4,5	-2,0	-70,9	32,9	61,0	49,2	30,3	4,8
6° - 22/10/2012	-3,8	4,5	-2,0	-68,3	46,5	61,0	49,2	30,4	9,6
7° - 23/10/2012	1,5	4,5	-2,0	-31,0	49,3	61,0	49,2	31,6	24,6
8° - 24/10/2012	1,5	4,5	-2,0	-1,7	49,3	61,0	49,2	49,2	35,4

Fonte: O autor

Figura 46 – Análise Integrada: Evento 1 – 17/10/2012 à 24/10/2012



Fonte: O autor

Nos três primeiros dias, a sucção registrada para a profundidade de 15 cm foi aumentando visto que não houve registros de precipitação, bem como em 90 cm. Com as chuvas fracas registradas do 4º ao 6º dia - de menos de 10 mm/dia - a umidade da medida mais superficial apresentou certa variação, mas não foi o suficiente para saturar esta profundidade, enquanto que a cota mais profunda não apresentou alteração na umidade com essas pluviosidades. Finalmente, no 7º e 8º dia ocorreram precipitações fortes de 24,6 e 35,4 mm/dia, respectivamente, e em 15 cm atingiu-se a umidade de saturação.

Após a passagem da água pela superfície do solo no 7º dia, as medidas superiores atingiram alto teor de umidade, enquanto que a camada inferior de 90 cm continuou apresentando baixo teor de umidade. Após, houve a tendência de um movimento descendente da água, provocando o umedecimento da camada inferior, ou seja, ocorreu uma redistribuição da umidade no solo. Somente no 8º dia a profundidade de 90 cm aproximou-se da umidade de 49,2%, podendo considerar todo o perfil analisado como saturado. Portanto, as forças de sucção não são necessariamente destruídas imediatamente com os eventos de chuva, no qual a existência desta tensão contribui para aumentar a resistência do solo e conseqüentemente promover uma maior estabilidade para a encosta.

Conclui-se que no evento 1, para saturar o primeiro metro do solo foi necessária uma precipitação forte de 35,4 mm/dia juntamente com um acumulado de 39 mm em 72 horas. Ou ainda, após um período de chuvisco e chuva fraca, um acumulado de 74,6 mm em 5 dias foi o suficiente para gerar poro pressão positiva em todas as profundidades analisadas. Sendo assim, chuvas fracas à moderada que ocorrem continuamente possuem uma tendência à infiltração, pois a altura de coluna d'água acumulada mantém a alta umidade no maciço. Isto pode influenciar diretamente na estabilidade de um talude, principalmente quando após o acúmulo de chuva fraca à moderada ocorra um evento de precipitação forte ou extremo.

O segundo evento selecionado para a análise compreende os dias 31/10/2012 à 10/11/2012. Os resultados estão expostos na Tabela 15 e no gráfico da Figura 47, sendo que o acumulado de chuva em 72 horas antecedentes ao dia 31 foi de 3 mm, e nos últimos 7 dias apresentou 30,4 mm de precipitação. No dia 31/10/2012, todas as profundidades analisadas apresentavam condição inicial do solo muito próximo à saturação, sendo que nos 7 dias antecedentes não havia ocorrido um evento pluviométrico de alta intensidade (chuva forte ou extrema), mas sim, um acumulado

de 30,4 mm (chuva fraca à moderada). No dia primeiro de novembro, com uma chuva de intensidade de 15,4 mm/dia, registrou-se a saturação das duas profundidades iniciais e, em contrapartida, na profundidade de 90 cm ocorreu o aumento da tensão matricial. Logo, chuvas fracas à moderadas, porém agindo em um período de tempo continuado possuem uma tendência à infiltração, o que mantém a alta umidade no maciço e, conseqüentemente, maiores valores de poro pressão.

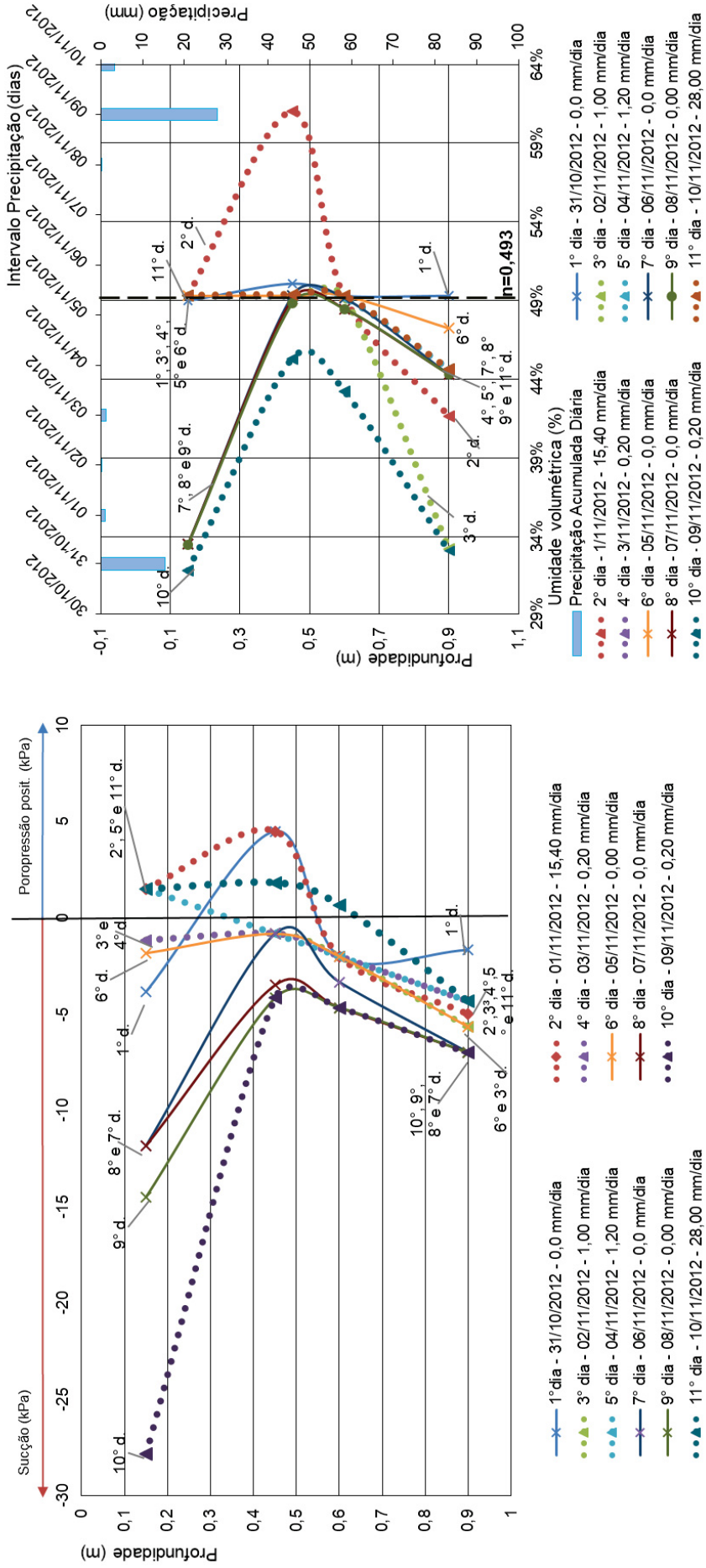
Tabela 15 – Evento 2 – 31/10/2012 à 10/11/2012

Dia Leitura Tensiômetro (n)	Sucção (-) e Poro pressão (+) (kPa)				Umidade (%)				Chuva (mm/dia) (n-1)
	T1 15 cm	T2 45 cm	T3 60 cm	T4 90 cm	T1 15 cm	T2 45 cm	T3 60 cm	T4 90 cm	
1° - 31/10/2012	-3,8	4,5	-2,0	-1,7	49,0	50,1	49,3	49,3	0,0
2° - 01/11/2012	1,5	4,5	-2,0	-5,0	49,3	61,0	49,2	41,7	15,4
3° - 02/11/2012	-1,2	-0,8	-2,0	-5,7	49,3	49,3	49,2	33,2	1,0
4° - 03/11/2012	-1,2	-0,8	-2,0	-4,3	49,3	49,3	49,2	44,7	0,2
5° - 04/11/2012	1,5	-0,8	-2,0	-4,3	49,3	49,3	49,2	44,7	1,2
6° - 05/11/2012	-1,8	-0,8	-2,0	-5,7	49,3	49,3	49,3	47,2	0,0
7° - 06/11/2012	-11,8	-0,8	-3,3	-7,0	33,5	49,3	49,1	44,3	0,0
8° - 07/11/2012	-11,8	-3,5	-4,7	-7,0	33,5	49,1	48,5	44,3	0,0
9° - 08/11/2012	-14,5	-4,2	-4,7	-7,0	33,5	48,8	48,5	44,3	0,0
10° - 09/11/2012	-27,8	-4,2	-4,7	-7,0	31,8	45,3	43,2	33,1	0,2
11° - 10/11/2012	1,5	1,8	0,7	-4,3	49,3	49,4	49,3	44,7	28,0

Fonte: O autor

Nos dias 02 e 03 de novembro, ocorreram chuvisco e chuva fraca e o solo manteve-se não saturado em todas as profundidades. Estima-se que a progressão da frente de umedecimento da chuva de 15,4 mm/dia só atingiu a profundidade de 90 cm no dia 03/11/2011, quando houve diminuição da sucção registrada. Do dia 04 ao dia 09 ocorreram chuvisco e chuva fraca ou nulas, e de maneira geral, a umidade foi diminuindo nesse período em todas os pontos analisados, havendo incremento na resistência do maciço devido ao aumento da sucção matricial. A menor umidade registrada nesse evento foi no dia 09/11/2012, com 31,8% na profundidade de 15 cm, após um período sem eventos pluviométricos.

Figura 47 – Análise Integrada: Evento 2 – 31/10/2012 à 10/11/2012



Fonte: O autor

Com a condição do solo não saturado em todas as profundidades no dia 09/11/2012, a precipitação “n-1” do dia 10, com intensidade de 28 mm/dia foi o suficiente para saturar o solo até a profundidade de 60 cm, e aumentar a umidade na profundidade de 90 cm. Em contrapartida, quando a situação inicial do solo estava em alta umidade, como no dia 31/10, a chuva de 15,4 mm/dia do dia seguinte afetou mais significativamente a cota de 15 cm, praticamente sem aumento de umidade nas outras camadas. Portanto, o efeito das chuvas no acréscimo da umidade do solo devido a infiltração foi altamente influenciado pelas condições iniciais do solo, que por sua vez, são caracterizadas pelos eventos antecedentes de chuvas.

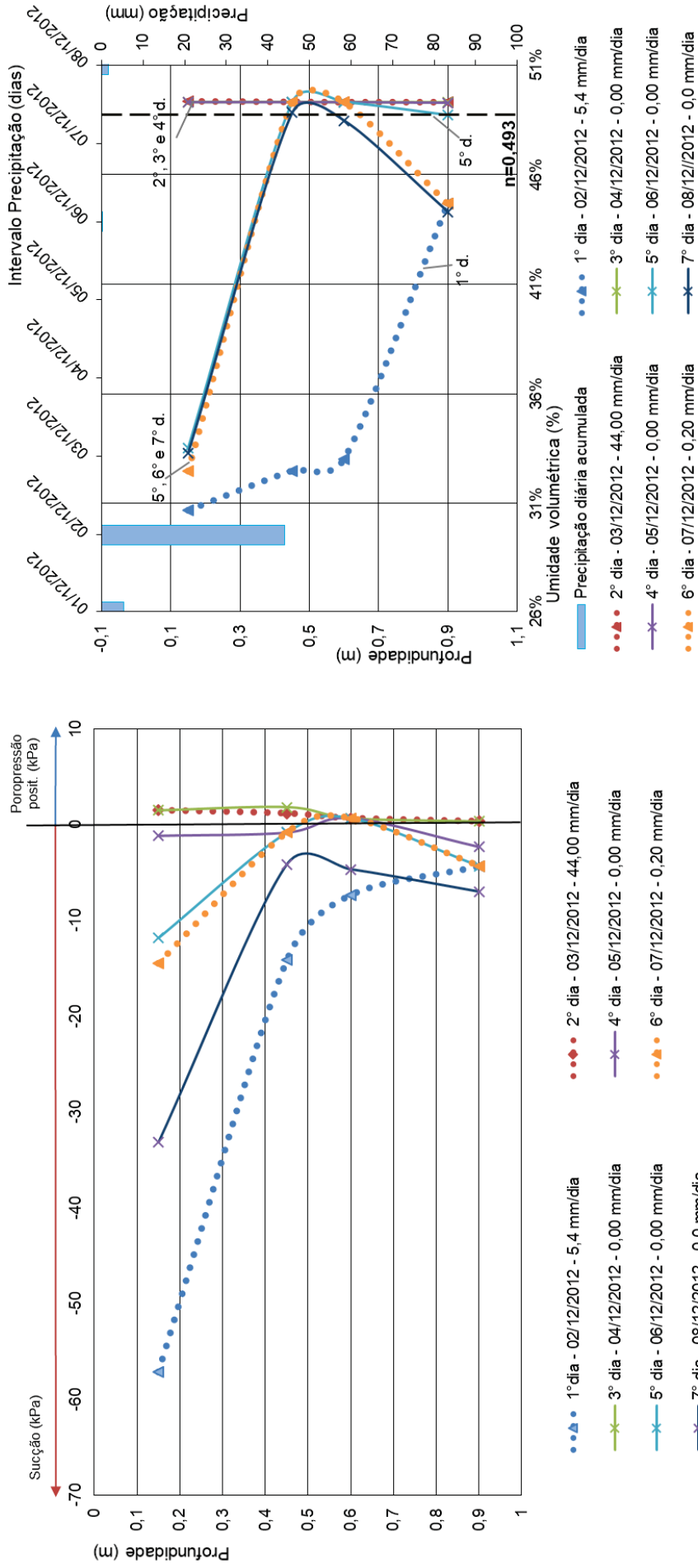
Na Tabela 16, estão sintetizados os dados correspondentes ao evento 3 selecionado, entre os dias 02/12/2012 a 08/12/2012, e que estão correlacionados na Figura 48. Neste evento, o acumulado de chuva em 72 horas antecedentes ao dia 02/12/2012 foi de 5,60 mm.

Tabela 16 – Evento 3 – 02/12/2012 a 08/12/2012

Dia Leitura Tensiômetro	Sucção (-) e Poro pressão (+) (kPa)				Umidade (%)				Chuva (mm/dia) (n-1)
	T1 15 cm	T2 45 cm	T3 60 cm	T4 90 cm	T1 15 cm	T2 45 cm	T3 60 cm	T4 90 cm	
1° - 02/12/2012	-57,1	-14,2	-7,3	-4,3	30,7	32,5	33,0	44,7	5,4
2° - 03/12/2012	1,5	1,2	0,7	0,3	49,3	49,3	49,3	49,3	44,0
3° - 04/12/2012	1,5	1,8	0,7	0,3	49,3	49,3	49,3	49,3	0,0
4° - 05/12/2012	-1,2	-0,8	0,7	-2,3	49,3	49,3	49,3	49,3	0,0
5° - 06/12/2012	-11,8	-0,8	0,7	-4,3	33,5	49,3	49,3	48,7	0,0
6° - 07/12/2012	-14,5	-0,8	0,7	-4,3	32,5	49,3	49,3	44,7	0,2
7° - 08/12/2012	-33,1	-4,2	-4,7	-7,0	33,3	48,8	48,5	44,3	0,0

Fonte: O autor

Figura 48 – Análise Integrada: Evento 3 – 02/12/2012 a 08/12/2012



Fonte: O autor

A condição inicial do solo no dia 02/12/2012 era não saturado, apresentando umidade média nas três primeiras profundidades de 32,1%. Ao ser comparado com os dados da série do tensiômetro, este valor está na faixa das menores umidades registradas no período de medição e, conseqüentemente, um dos maiores valores de sucção registrado pela série.

No dia 03/12/2012 ocorreu uma precipitação de 44,0 mm/dia, que ocasionou a saturação de toda a camada de solo analisada. Nos três dias subsequentes não houveram registros de precipitações diárias, porém o solo permaneceu com umidade de 49,3% até o segundo dia após a precipitação, indicando a permanência da condição saturada mesmo após o término do evento chuvoso. Portanto, a umidade inicial do solo interferiu diretamente na velocidade de infiltração da água no solo, ou seja, no avanço da frente de umedecimento.

Até a data de 08/12/2012 ocorreram chuviscos e dias secos, e o solo recuperou a condição não saturada, apesar de apresentar níveis de sucção menores que quando comparada à condição inicial. Portanto, as medidas de campo demonstraram que chuvas fortes e de curta duração são suficientes para destruir as forças de sucção no primeiro metro de profundidade, sendo os incrementos de poro pressão dissipados dentro de cerca de cinco dias, o que depende diretamente da permeabilidade do maciço.

Finalmente, foi selecionado um quarto evento para análise, com fins de relacionar a ocorrência de chuvas extremas após um período de grandes alturas de chuvas acumuladas. Na Tabela 17 estão expostos os dados correspondentes aos dias 24/12/2012 a 02/01/2013, os quais também estão apresentados na Figura 49. Este evento foi selecionado para analisar o comportamento do solo frente ao evento de chuva do dia 30/12/2012, que registrou uma intensidade pluviométrica de 83,4 mm/dia, com uma altura de lâmina d'água acumulada de 76,0 mm nas 72 horas antecedentes.

Até o 5º dia deste período em análise, ocorreram dias secos, chuviscos e chuvas fracas, resultando numa umidade média de 33,0% na profundidade de 15 cm, e nas demais a umidade se manteve próximo ou igual à situação de saturação, com umidade volumétrica de 49,3%. Com os eventos pluviométricos extremos dos 6º e 7º dias, ocorreu a total saturação do solo.

Tabela 17 – Evento 4 – 24/12/2012 a 02/01/2013

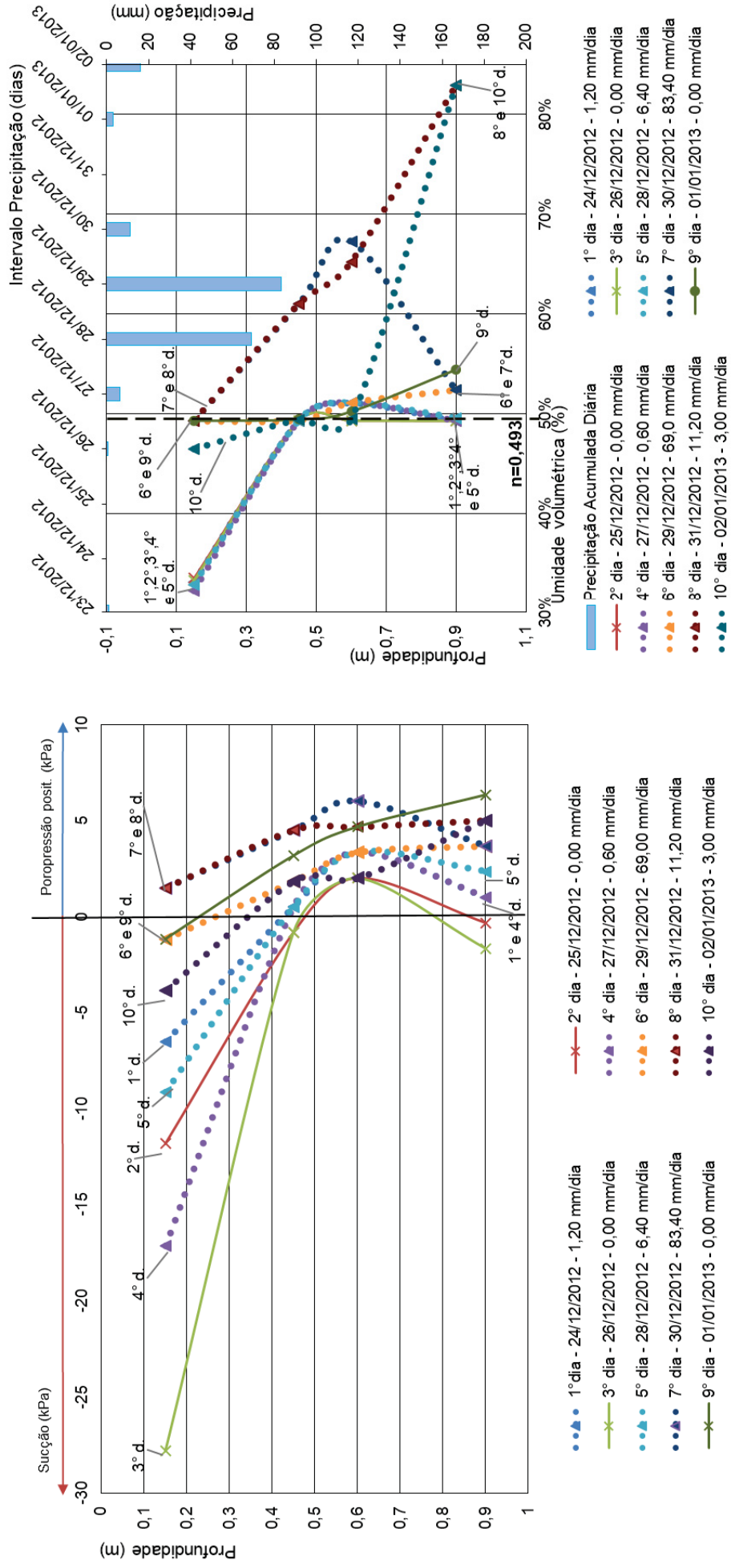
Dia Leitura Tensiômetro	Sucção (-) e Poro pressão (+) (kPa)				Umidade (%)				Chuva (mm/dia)
	T1 15 cm	T2 45 cm	T3 60 cm	T4 90 cm	T1 15 cm	T2 45 cm	T3 60 cm	T4 90 cm	
(n)									(n-1)
1° - 24/12/2012	-6,5	0,5	3,3	1,0	33,1	49,3	51,1	49,3	1,20
2° - 25/12/2012	-11,8	-0,8	2,0	-0,3	33,5	49,3	49,3	49,3	0,0
3° - 26/12/2012	-27,8	-0,8	2,0	-1,7	33,3	49,3	49,3	49,3	0,0
4° - 27/12/2012	-17,2	0,5	3,3	1,0	32,3	49,3	51,1	49,3	0,6
5° - 28/12/2012	-9,2	0,5	3,3	2,3	32,9	49,3	51,1	49,6	6,4
6° - 29/12/2012	-1,2	1,8	3,3	3,7	49,3	49,4	51,1	52,4	69,0
7° - 30/12/2012	1,5	4,5	6,0	3,7	49,3	61,0	67,2	52,4	83,4
8° - 31/12/2012	1,5	4,5	4,7	5,0	49,3	61,0	65,2	82,9	11,2
9° - 01/01/2013	-1,2	3,2	4,7	6,3	49,3	49,4	50,2	54,4	0,0
10° - 02/01/2013	-3,8	1,8	2,0	5,0	46,5	49,4	49,4	82,9	3,0

Fonte: O autor

Até o 10° dia do evento, a profundidade de 15 cm recuperou certo valor de sucção matricial, porém, em contrapartida, houve a redistribuição da umidade ao longo da profundidade após a saturação superficial em decorrência da infiltração da chuva. Ou seja, após cerca de 3 dias de um evento extremo e grande acumulado de precipitação, a frente de umedecimento atingiu a profundidade de 90 cm, pois os processos de fluxo interno continuam a ocorrer após as chuvas terem cessado.

Em todos os eventos analisados, após a infiltração da chuva houve uma redução da sucção, que causa certa perda de resistência ao cisalhamento, e que conseqüentemente pode desencadear um processo de ruptura no talude. Comumente associa-se a ruptura de taludes devido à elevação do nível freático e conseqüente saturação completa do maciço. Na encosta em estudo foi considerado que o nível freático se encontra em profundidade devido principalmente ao faturamento da rocha granítica. Portanto, nas profundidades estudadas na análise integrada, as mudanças de poro pressão foram associadas diretamente aos efeitos climáticos na superfície.

Figura 49 – Análise Integrada: Evento 4 – 24/12/2012 a 02/01/2013



Fonte: O autor

A partir de análises simplificadas como essa, é possível relacionar a dinâmica da variação da umidade ao longo da profundidade com o tempo. A condição inicial do solo, antes do evento extremo de precipitação, teve influência direta no desenvolvimento da frente de umedecimento. Apesar da simplicidade, esta análise permitiu avaliar a ordem de grandeza das variações de umidade esperadas no perfil.

5.6 MODELAGEM NUMÉRICA

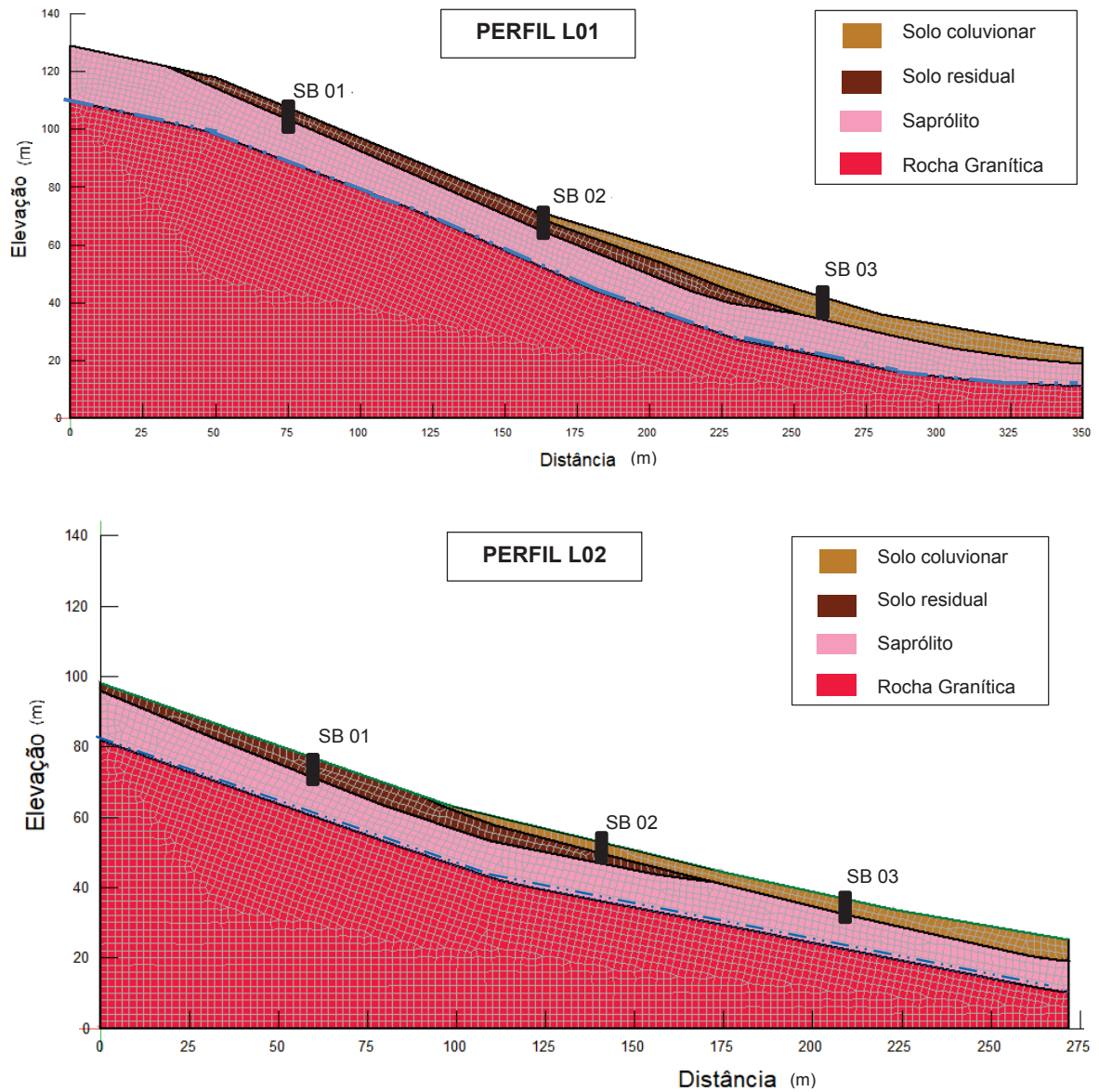
Há uma série de fatores que governam a estabilidade de taludes durante um evento pluviométrico, dentre os quais destacam-se a geometria da encosta, as propriedades do solo, a intensidade e duração da chuva, além das condições antecedentes de umidade.

5.6.1 Definição dos perfis geológicos-geotécnicos

Para a análise hidrodinâmica do comportamento do talude frente à eventos pluviométricos foi necessário a elaboração de perfis geológico-geotécnicos representativos do local de estudo. Frente às constatações apresentadas no capítulo 3 e às condições topográficas e de declividade, dois perfis representativos do talude analisado foram elaborados (Figura 50), os quais estão localizados conforme mostra a Figura 51. As distâncias destacadas para cada subseção (SB) são referentes ao deslocamento em relação à origem do plano cartesiano que define o talude. Os perfis foram desenvolvidos considerando as regiões onde já haviam ocorrido movimentos de massa, e foram discretizados com uma malha de elementos finitos composta por quadriláteros e triângulos, com tamanho médio de 1 m.

Os perfis geológico-geotécnicos foram interpretados com simplificações, uma vez que para se obter melhor grau de detalhamento seria necessário uma maior quantidade e variabilidade de ensaios e equipamentos de medição. Os perfis apresentaram três diferentes camadas de solos, duas camadas diferenciadas pelo grau de intemperismo na rocha e uma última unidade de rocha sem alteração. Durante as visitas de campo foi possível observar a variabilidade dos materiais que compõem o local, com identificação de estruturas geológicas, drenagens, entre outros, sendo que a continuidade das camadas e o nível d'água foi extrapolado.

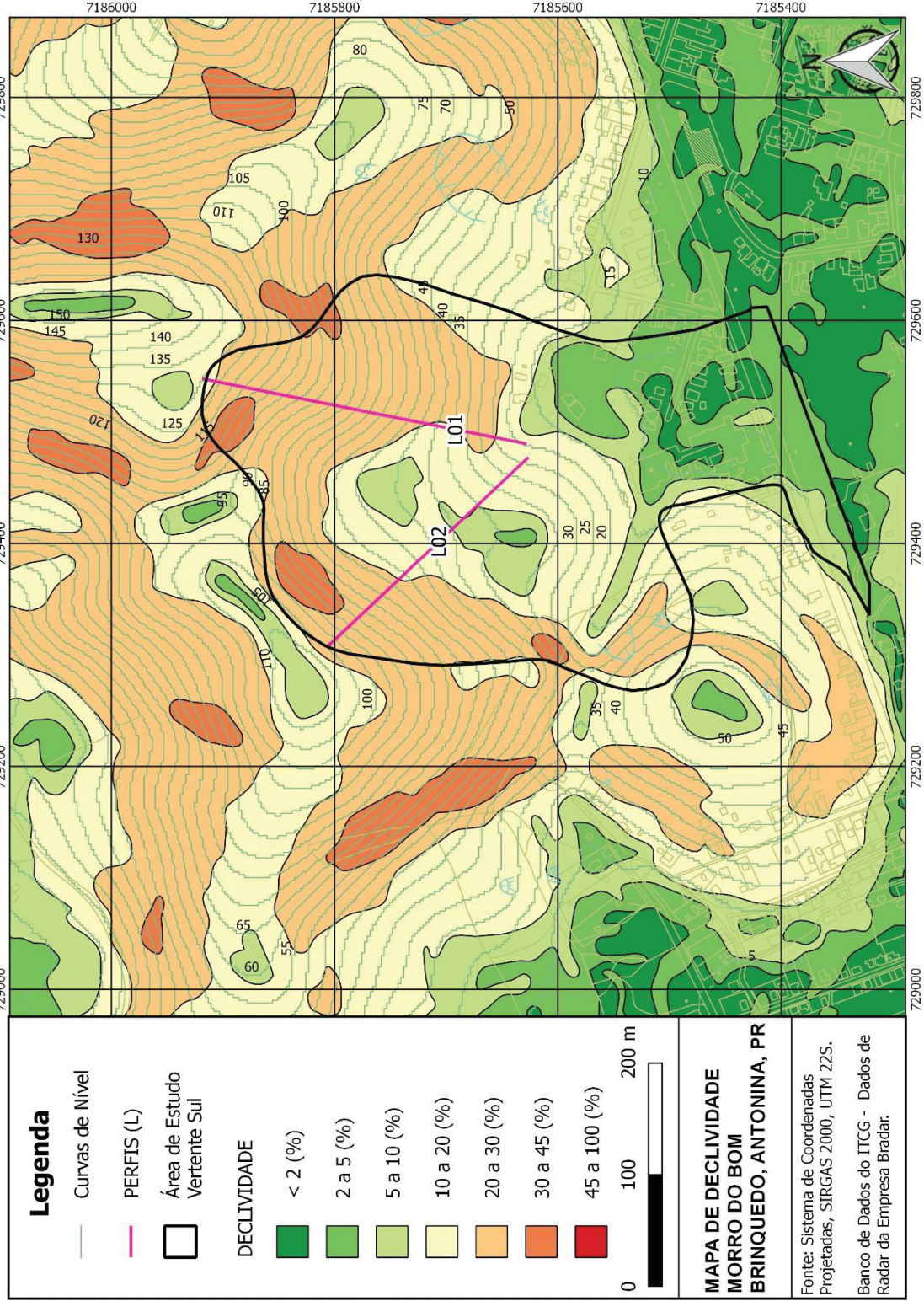
Figura 50 – Perfis geológicos-geotécnicos da área em estudo



Fonte: O autor

Constatou-se que a camada de solo superficial de cor escura e rasa (cerca de 20 cm) é predominantemente orgânica, principalmente devido à presença de raízes da vegetação, porém ela foi modelada como parte da camada de solo residual. Na região superior e da meia encosta dos perfis foi possível identificar a presença de um solo residual de granito, com característica mais arenosa, porém com presença também significativa de argila.

Figura 51 – Declividade média da área de estudo e localização dos perfis



Fonte: O autor

Na meia encosta inferior e na base, o material é composto por um solo mais argiloso, caracterizando-se como um depósito de material superficial composto por tálus e colúvio, ou seja, formado pelo deslizamento de solos e de blocos de rochas a partir do topo da encosta e acumulado da porção de meia encosta e na base.

A presença de fraturas de rocha, comum em regiões de clima tropical, herdadas pelo saprólito do granito no Morro do Bom Brinquedo ocasionam uma permeabilidade superior ao do solo, o que cria situações de fluxo preferencial, na qual o nível freático se mantém profundo (WOLLE, 1988; MARCHI e PICANÇO, 2012). Ferreira (2017) também constatou que o nível d'água máximo, mínimo e médio de piezômetros instalados em um talude da Serra do Mar ficaram muito próximos entre si, o que indica pouca variação sazonal. Portanto, para definir o nível do lençol freático no local, considerou-se a surgência de água observada no sopé, sendo que ao longo da declividade foi considerado o nível d'água mais profundo, o que condiz com a situação de fraturação da rocha granítica e com a simulação em situação de não saturação.

5.6.2 Definição dos cenários de chuva

Para realizar a modelagem numérica, foi necessária a criação de cenários de precipitação pluviométrica, com fins de verificar a estabilidade de encostas a partir de eventos chuvosos. Não há um consenso na literatura quanto à determinação de quais índices pluviométricos devam-se utilizar. Alguns autores afirmam que somente a ocorrência de precipitações prolongadas, associadas com eventos de chuva concentrada são capazes de produzir cenários de instabilidade, enquanto outros constataram que o acúmulo de alturas de precipitação prolongadas configuram-se suficientes para a ocorrência de MGM (IVERSON, 2000; BIGARELLA, 2003; AHRENDT, 2005; MINEROPAR, 2013). Segundo Iverson (2000), movimentos gravitacionais de massa resultam da combinação de eventos isolados de chuva intensa com intensidades variáveis, associados à ocorrência de precipitações prolongadas por períodos também variáveis, o que dificulta a modelagem matemática a partir de dados empíricos.

Deste modo, os índices pluviométricos isolados e estáticos não são suficientes para prever eventos provocados por interações não-lineares entre a chuva e os deslizamentos, podendo resultar em grande margem de erro nas previsões.

Portanto, como os índices de chuva flutuam ao longo do tempo, foi usado índices que relacionam intensidades máximas, a duração e a sazonalidade de acordo com o período de retorno dos eventos.

O método IDF foi aplicado para um período de retorno (TR) de 100 anos, com tempos de duração do evento pluviométrico de 1 hora e 1 dia, para auscultar sobre eventos curtos de chuva e de alta intensidade, e de 7 e 30 dias para investigar a ocorrência de períodos de chuvas prolongadas e de baixa intensidade. Através da análise integrada realizada, notou-se que o local tem escassos períodos sem a ocorrência de precipitações, sendo comum apresentar consideráveis acumulados de chuva de baixa intensidade, mas por períodos prolongados. Portanto, foi simulado os cenários 5 a 8 por meio da combinação dos cenários IDF com um episódio de chuva muito extrema, com intensidade concentrada de 174,40 mm/d. Esta precipitação corresponde à maior chuva diária registrada pela série do pluviógrafo Samae Antonina instalado no Morro do Bom Brinquedo, entre os anos de 2013 e 2017. Esta chuva extrema e concentrada foi aplicada nos cenários no dia seguinte ao término do tempo “t” da relação IDF. A síntese dos cenários aplicados está apresentada na Tabela 18.

Tabela 18 – Cenários de chuva para tempo de retorno de 100 anos

Cenário	Tempo de duração		Intensidade IDF	Intensidade concentrada	Precipitação acumulada
	t (min)	t (dias)	i (mm/h)	(mm/d)	(mm)
01	60	0,04167	106,08	-	106,08
02	1440	1	9,16	-	219,72
03	10080	7	1,36	-	229,25
04	43200	30	0,32	-	230,81
05	60	0,04167	106,08	174,40	280,48
06	1440	1	9,16	174,40	394,12
07	10080	7	1,36	174,40	403,65
08	43200	30	0,32	174,40	405,21

Fonte: O autor

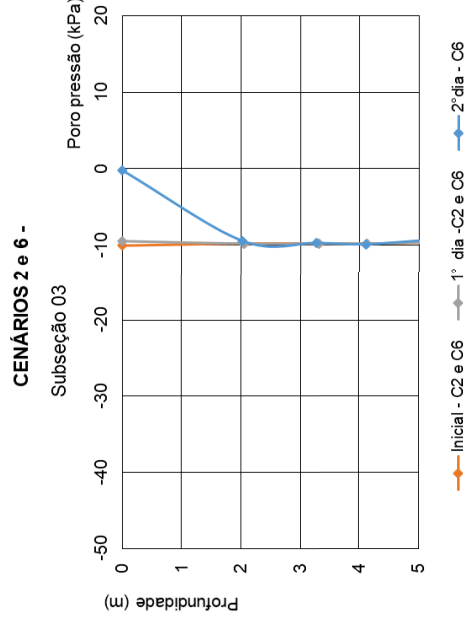
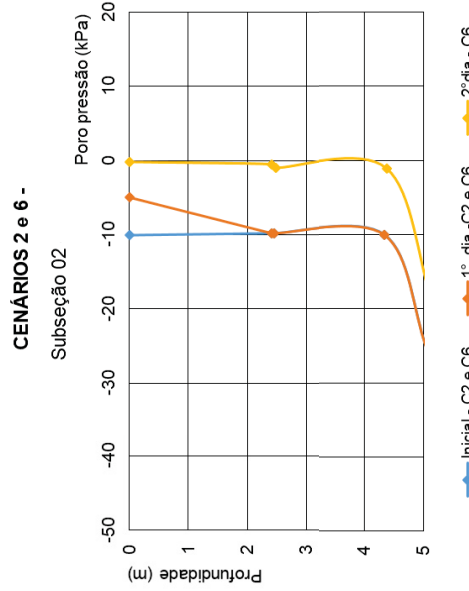
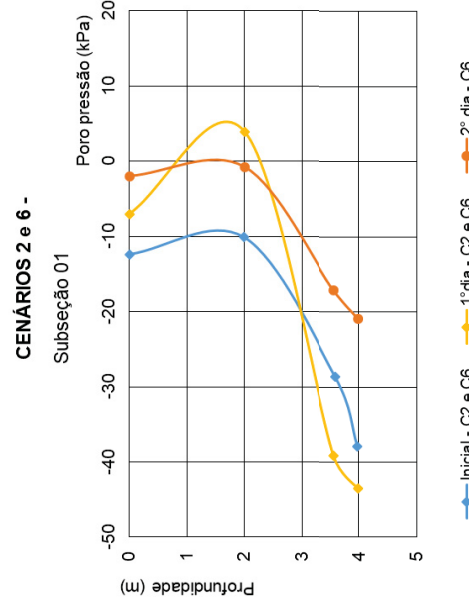
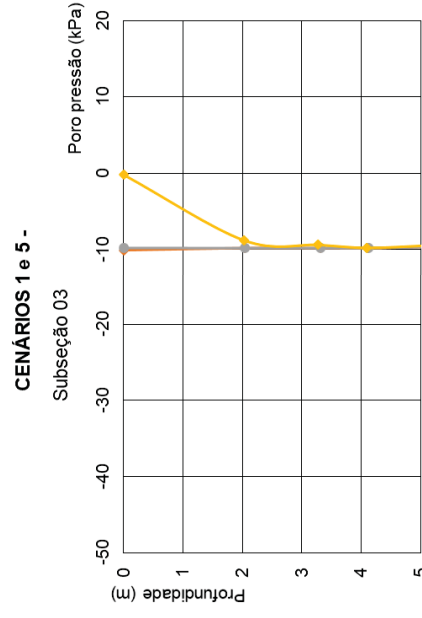
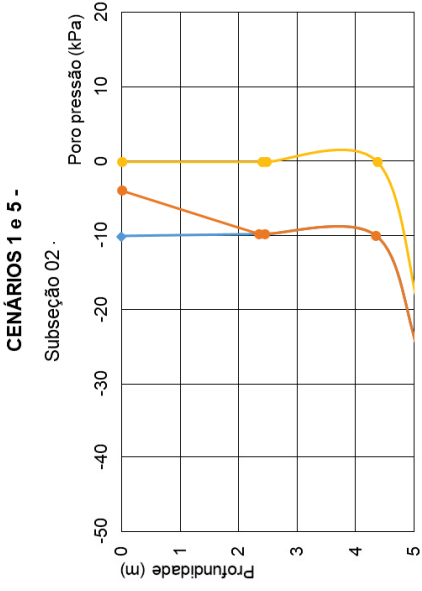
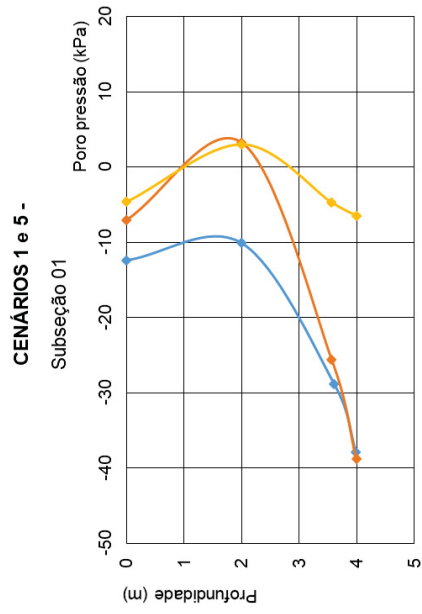
5.6.3 Análise de fluxo

Na análise de fluxo transiente, as subseções estabelecidas para cada um dos dois perfis estratigráficos foram utilizadas para a coleta em profundidade das leituras de sucção e poro pressão, de acordo com a variação pluviométrica. Desta maneira, na Figura 52 está apresentada a variação da poro pressão no perfil L01, para os cenários 1, 2, 5 e 6 propostos.

Em relação ao perfil L01, a chuva do cenário 1 simulado, com 106,08 mm/h e com duração de uma hora, não foi suficiente para saturar a camada superficial do solo em nenhuma das subseções estudadas, porém aumentou o teor de umidade do maciço. Assim, a chuva de 174,4 mm/d do cenário 5 foi aplicada sob condição de umidade inicial superior ao cenário 1. Desta maneira, no cenário 5 houve a saturação do solo em alguns pontos do perfil L01. Para os cenários 1, 2, 5 e 6 a subseção 03 apresentou coluna de infiltração até a profundidade de 2 metros.

De maneira geral, a precipitação de curta duração e alta intensidade do cenário 2 infiltrou na mesma magnitude que no cenário 1, sendo que a maior diferença de comportamento entre os dois cenários foi registrada na subseção 01. O cenário 6 foi realizado para complementar o 2 (gerado pelas curvas IDF). Deste modo, a chuva concentrada aplicada do cenário 6 saturou as subseções analisadas na cota superficial.

Figura 52 – Cenários 1, 2, 5 e 6 – Perfil L01



Fonte: O autor

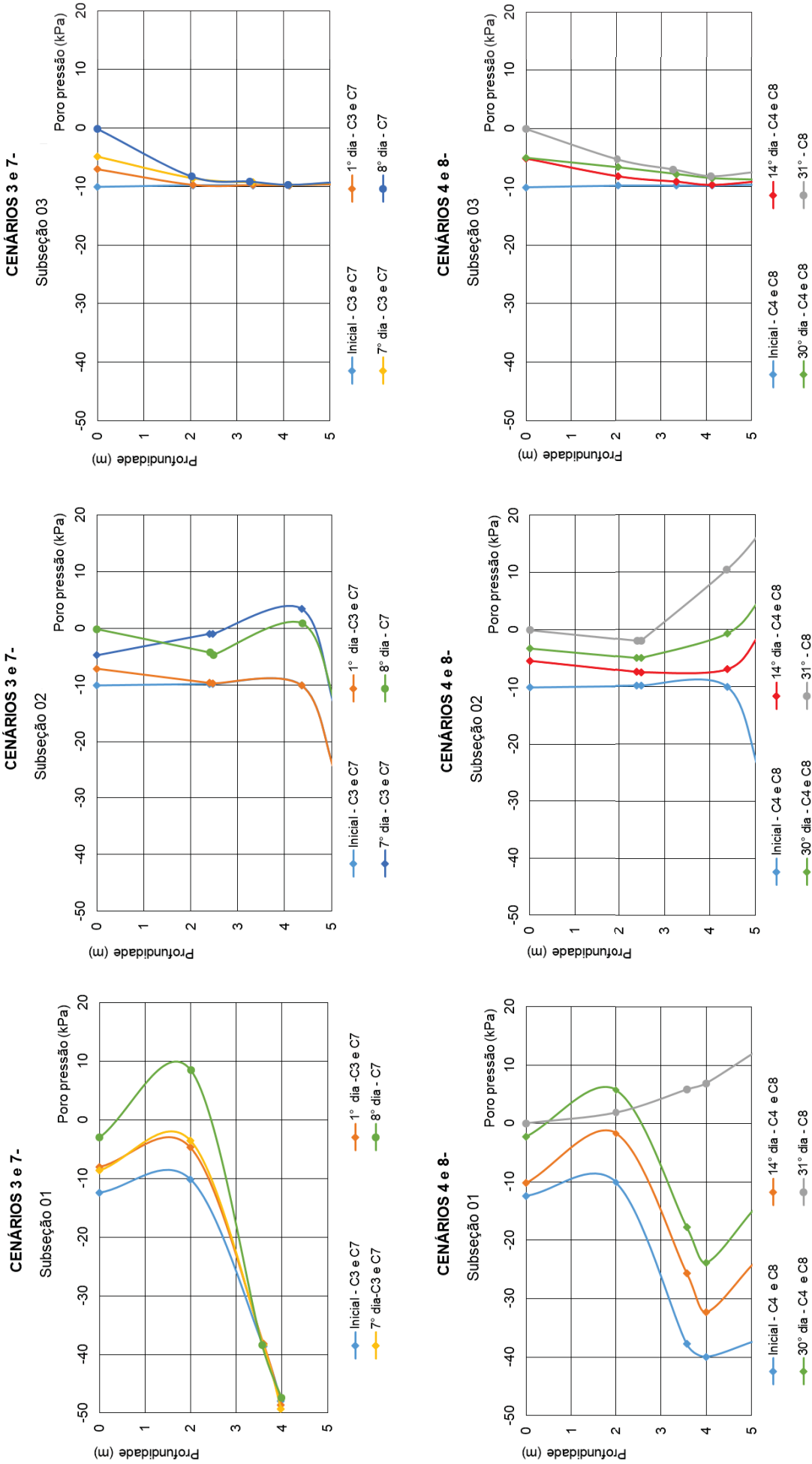
Na Figura 53 está sintetizado a variação da poro pressão no perfil L01, para os cenários 3, 4, 7 e 8 propostos.

O cenário 3 foi constituído por uma chuva de menor intensidade distribuída num maior período de tempo. Desta maneira, no fim deste cenário o perfil L01 apresentou um avanço da frente de umedecimento na profundidade do solo, se comparado com os cenários 1 e 2. Com o maior tempo de duração do evento chuvoso, o solo se mantém mais úmido por mais tempo, apresentando uma tendência à infiltração, mesmo para precipitações de baixa intensidade.

Com a aplicação da chuva do cenário 7, em complemento ao cenário 3, o solo saturou na superfície e diminuiu a sucção em maiores profundidades, em todas as subseções. No 8º dia do evento 7, a subseção 01 do perfil 02 apresentou formação de cerca de 1 metro de coluna d'água na profundidade 5 metros.

Os cenários 4 e 8 de precipitação foram os que provocaram maior variação na poro pressão do perfil L01. A recorrente ocorrência de baixa intensidade pluviométrica durante 30 dias, com a posterior aplicação de uma chuva concentrada muito extrema no 31º dia, fez com que as subseções 01 e 02 saturassem completamente, além de apresentar a formação de uma coluna d'água entre 2,5 e 5 m de profundidade, aproximadamente.

Figura 53 – Cenários 3, 4, 7 e 8 – Perfil L01



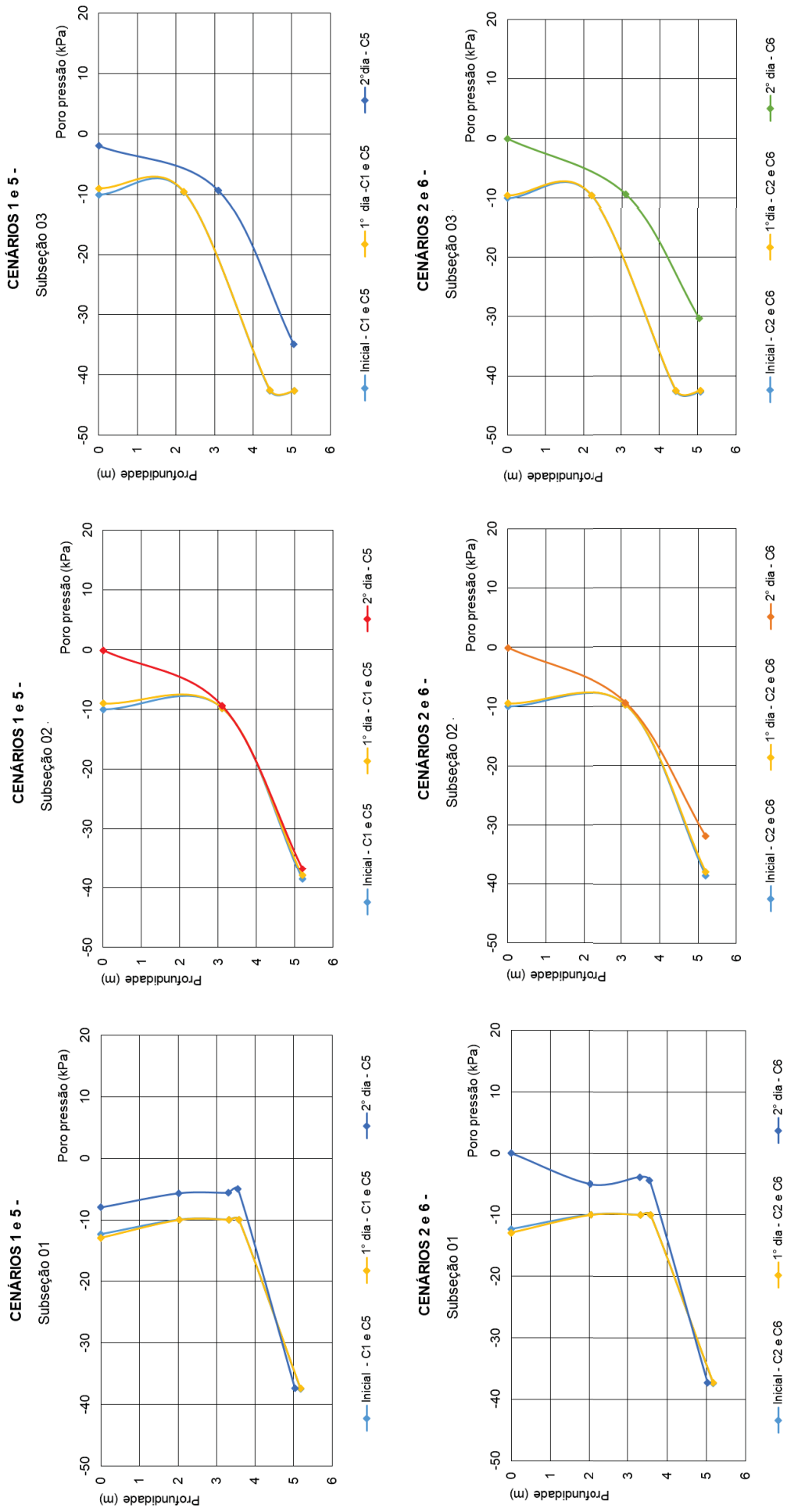
Fonte: O autor

A Figura 54 traz os resultados da análise de fluxo transiente aplicada nos cenários 1, 2, 5 e 6 do perfil L02.

A chuva do cenário 1 simulado, com 106,08 mm/h e com duração de uma hora, não foi suficiente para saturar a camada superficial do solo em nenhuma das subseções do perfil L02. Com a aplicação da chuva concentrada do cenário 5, houve a diminuição da sucção do solo, mas sem chegar à saturação, em todas as subseções analisadas. Na subseção 02, os cenários 1, 2, 5 e 6 apresentaram profundidade de infiltração de até 3 metros.

No perfil L02, os cenários 1 e 2 de chuva não alteraram os valores de sucção a partir da profundidade de 3,5 m, aproximadamente. O cenário 6 foi realizado para complementar o 2 (gerado pelas curvas IDF). Deste modo, a chuva concentrada aplicada do cenário 6 saturou as subseções analisadas na cota superficial.

Figura 54 – Cenários 1, 2, 5 e 6 – Perfil L02



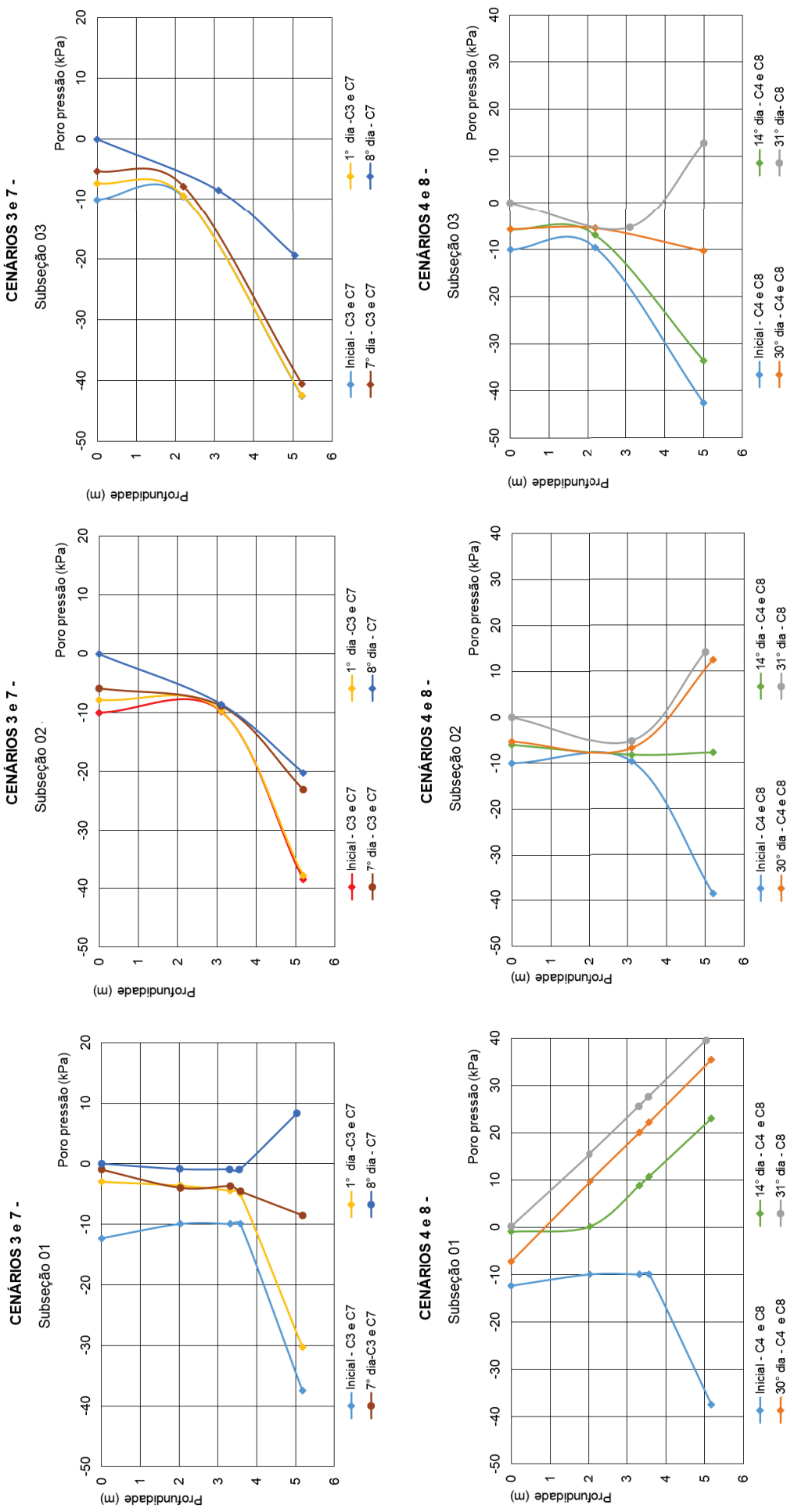
Fonte: O autor

Na Figura 55, está representado os resultados da análise de fluxo para o perfil L02, em relação aos cenários 3, 4, 7 e 8 propostos.

No perfil L02, o cenário 3 não saturou o solo em nenhuma das subseções analisadas. Com a aplicação da chuva do cenário 7, o solo saturou na superfície e diminuiu a sucção em maiores profundidades, em todos os casos.

Os cenários 4 e 8 de precipitação foram os que provocaram maior variação da poro pressão no perfil L02. A chuva destes dois cenários ocasionou maior influência sobre os valores de poro pressão do maciço na subseção 01, do que nas outras duas subseções. Vale destacar que a subseção 01 está localizada sob um solo residual (material arenoso), e como a areia tende a permitir maior percolação de água entre seus poros devido a uma maior granulometria dos seus grãos, maiores variações nesses locais podem ser observadas devido a esta característica.

Figura 55 – Cenários 3, 4, 7 e 8 – Perfil L02



Fonte: O autor

Para os dois perfis analisados (L01 e L02), apesar dos acumulados dos eventos 6 e 7 serem similares ao do evento 8, o comportamento diferenciado pode ser explicado devido ao fato de nos dois primeiros ocorrer maior escoamento superficial ocasionado pela menor duração do evento, quando a altura de chuva se equipara à capacidade de infiltração do solo superficial.

Nos dois perfis analisados (L01 e L02) ocorreu maior variação da poro pressão do solo devido à infiltração da chuva nos cenários 3 e 4 de baixa intensidade e longa duração, quando comparados com os eventos 1 e 2 de alta intensidade e curta duração. Porém, deve-se destacar que a condição inicial de umidade do solo apresentou grande influência nos resultados. Isto porque as chuvas de curta duração e alta intensidade dos cenários 7 e 8, ao serem aplicadas sobre os acumulados de chuva dos cenários 3 e 4, resultaram em um cenário de menor sucção inicial, ocasionando maiores profundidades de infiltração, além da saturação do solo em diversos pontos.

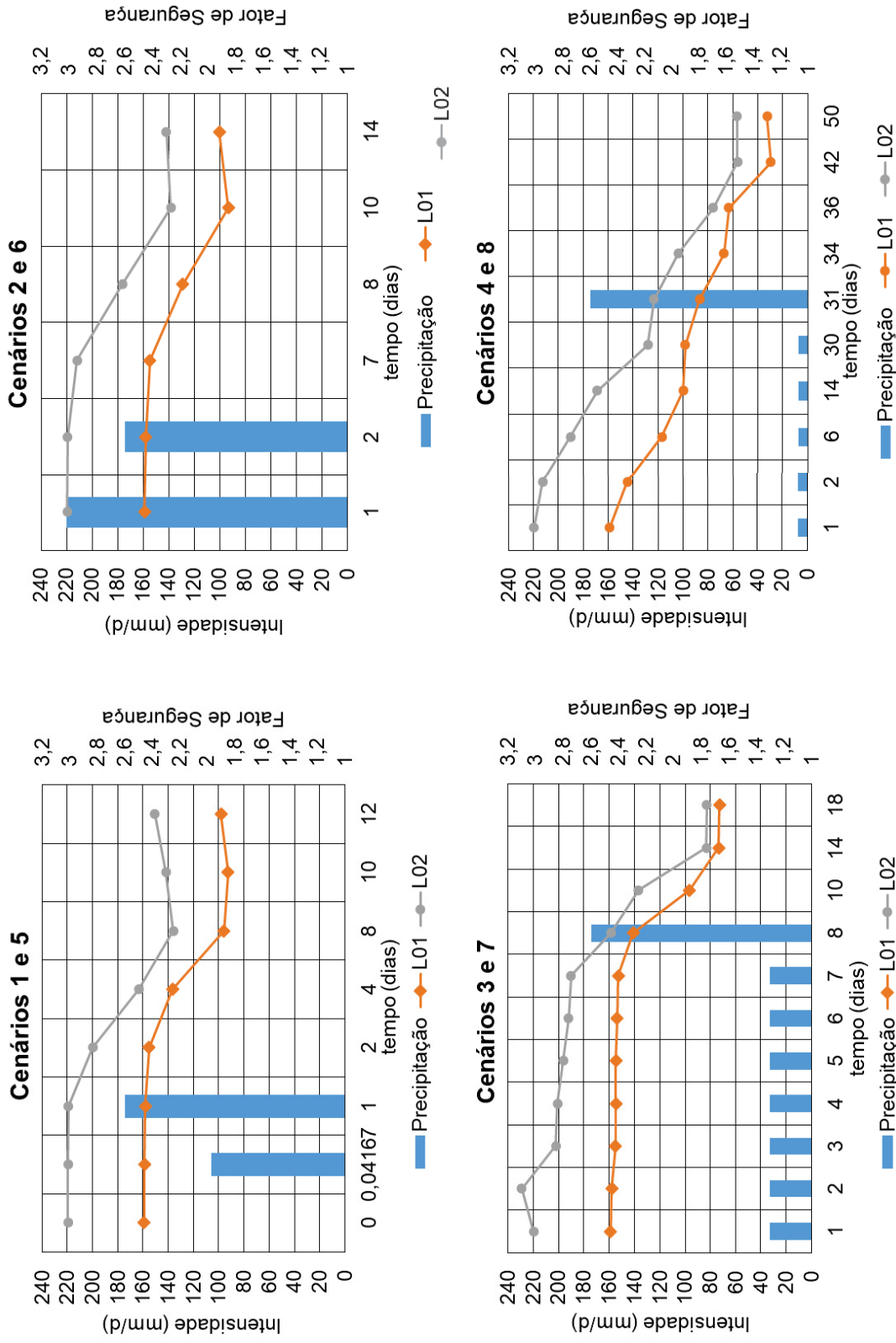
5.6.4 Análise de estabilidade

Após realizada a análise de fluxo transiente, foi analisada a influência da variação das propriedades hidrodinâmicas na estabilidade do talude em estudo, através da determinação do fator de segurança. A Figura 56 apresenta a variação do fator de segurança nos dois perfis analisados e em todos os cenários propostos.

O fator de segurança em encostas é regulamentado pela NBR 11682 (2009), que prescreve valores mínimos deste indicador entre 1,2 e 1,5. Neste trabalho foi considerado mínimo o FS de 1,5 o que, segundo a norma, representa um nível de segurança alto contra danos materiais, ambientais e vidas humanas. Nesta modelagem, foi utilizado a variação dos parâmetros de resistência pelo método de Monte Carlo, o qual resultou em valores médios, mínimos e máximos de FS, com desvio padrão médio de 0,09. Nesta análise foi utilizado o FS médio.

Em relação aos resultados, o perfil L02 é mais abatido e apresenta menor declividade quando comparado ao L01. Por isso, apresentou maior FS do que o L01, mantendo-se acima de 1,5 em todos os cenários de precipitação. Portanto, as maiores variações do fator de segurança foram registradas para o perfil L02.

Figura 56 – Fator de segurança médio em função dos cenários de precipitação 1 a 8



Fonte: O autor

Frente aos cenários aplicados, como esperado o fator de segurança decresce com a ocorrência de eventos pluviométricos, sendo mais perceptível a queda desse parâmetro nos cenários em que foram utilizadas alturas acumuladas de chuva em longos períodos de tempo. Nos cenários simulados com chuvas de alta intensidade e curta duração, percebe-se que o fator de segurança continua a decair dias após a ocorrência da chuva concentrada. Isto pode ser explicado pelo desenvolvimento da frente de umedecimento com o tempo, onde a infiltração atinge maiores profundidades, podendo gerar poro pressão positiva, e assim colaborar com a instabilidade.

Os eventos 1 e 2 estimados pela relação IDF, com alta intensidade num curto período de tempo não foram suficientes para causar a instabilidade do maciço. Tampouco precipitações de baixa intensidade e longa duração, como as apresentadas nos cenários 3 e 4, resultaram em fatores de segurança abaixo de 1,5. Portanto, os cenários 5 a 8 tiveram por principal objetivo simular a combinação de eventos extremos de chuvas, que apresentam grande potencial para a instabilidade.

Conforme observou-se na Figura 56, a chuva distribuída do cenário 8 levou a uma considerável diminuição do fator de segurança, alcançando o valor de 1,27. Este fator de segurança crítico foi encontrado no cenário em que ocorreu um acumulado de precipitação de 230,4 mm em 30 dias associados com um evento pontual de 174,40 mm/d, ou ainda, um acumulado de 405,21 mm em um mês. Estes resultados são condizentes com os observados nos eventos do item 5.5.2, nos quais o efeito das chuvas no acréscimo da umidade do solo devido à infiltração foi influenciado pelos eventos antecedentes de chuvas. Em complemento, através da análise dos dados pluviométricos, infere-se que a maior média mensal da série histórica foi de aproximadamente 397 mm, registrada no mês de janeiro de 2010. Dito isto, conclui-se que os fatores de segurança estimados estão condizentes com a realidade registrada no local. Portanto, o efeito das chuvas antecedentes é mais significativa e afeta mais a estabilidade dos solos quando associadas com uma precipitação de alta intensidade.

Ao analisar o método IDF como modelo para prever chuvas críticas para a ocorrência de movimentos de massa, este não se mostrou tão eficaz, sendo necessário a associação de chuvas concentradas nos cenários estudados. Visto que a relação das curvas IDF trata-se de um tratamento estatístico das máximas anuais da série histórica, esta busca interpolar as alturas acumuladas desses eventos

extremos, não caracterizando, necessariamente, uma situação crítica o suficiente para o deslizamento. Ou seja, são chuvas extremas, mas não obrigatoriamente críticas para o cenário de instabilidade. Outra limitação do método está na modelagem das curvas através de tempo de duração relativamente curtos (no presente caso até 72 horas), no qual a previsão de chuvas mais longas pode ser subdimensionada.

6 CONCLUSÃO

Com a realização deste estudo, pretendeu-se analisar o comportamento hidrodinâmico de um talude não saturado frente à eventos pluviométricos. A pesquisa foi aplicada em uma vertente do Morro do Bom Brinquedo, localizado na área urbana da cidade de Antonina, Paraná.

Conforme o objetivo específico de se obter as propriedades geotécnicas do solo em estudo, observou-se que apesar dos solos coluvionares (pontos 03 e 05) apresentarem uma maior variabilidade de tamanho dos grãos, estes possuíam pequena quantidade de pedregulho e grande predominância de finos, similares ao esperado para solos sedimentados. Os valores de limite de liquidez variaram entre 51% e 81%, e os de limite de plasticidade entre 35% e 45%, sendo que os pontos 01, 04 e 05 apresentaram o mesmo índice de 45%. O ponto 04, composto predominantemente por areia, apresentou a menor capacidade de armazenamento de água, com porosidade de 0,40.

A curva de retenção de água no solo (CRAS) permite determinar os teores de umidade residuais e as pressões de entrada de ar para cada tipo de poro. Todos os solos ensaiados apresentaram formato bimodal, caracterizando a presença de macroporos e microporos. Portanto, não foi possível ajustar os dados às relações empíricas consagradas na literatura, como a de Van Genuchten (1980) e de Fredlund e Xing (1994), visto que estas relações matemáticas são para curvas uni-modais. Os resultados do ensaio de sucção apontaram que o fenômeno da histerese teve maior influência para as situações em que se apresentaram níveis de sucção mais altos. Além disso, o solo arenoso ensaiado apresentou maior histerese quando comparado com os outros pontos amostrados, de granulometria mais fina.

Ainda em relação ao ensaio de sucção, dos três pontos de solo residual ensaiados, os resultados do ponto 04 apresentaram maior dispersão quando comparado aos outros dois, fato que pode ser explicado devido à composição granulométrica deste ponto ser mais grossa, com 42,84% de areia. Já os valores de retenção para o solo coluvionar apresentaram pouca dispersão entre os dois pontos, resultando em equações com ótimo ajuste aos dados ensaiados. Quando comparados os valores de umidade residual dos macroporos entre o solo residual (32%) e coluvionar (42,5%), tem-se que o primeiro resultou no menor valor. Ou seja, o solo

residual apresenta granulometria mais grossa e poros maiores, o que resulta na maior facilidade de liberar a água retida nos macroporos do solo.

Em relação à análise dos eventos pluviométricos, a incidência de chuvas com maiores intensidades se concentra, em sua maioria, na estação de verão. Este foi considerado o período com chuvas extremas na cidade de Antonina, pois podem apresentar riscos quanto à ocorrência de movimentos de massa. Por meio da análise das máximas precipitações anuais de acordo com o tempo de duração da chuva, conclui-se que os eventos extremos foram caracterizados por chuvas de maior tempo de duração e menor intensidade, sendo que no ano 2011 ocorreu o maior evento. O ajuste das curvas da relação IDF obtidas para a área de estudo apresentaram um erro absoluto médio de 1,52 mm/h, em relação à distribuição de Gumbel. Ao analisar o método IDF como modelo para prever chuvas críticas para a ocorrência de movimentos de massa, este não se mostrou tão eficaz, sendo necessário a associação de chuvas concentradas nos cenários estudados. Isto porque a relação das curvas IDF refere-se à um tratamento estatístico das máximas anuais da série histórica por meio da interpolação das alturas de coluna d'água acumuladas desses eventos, configurando-se situações extremas, mas não necessariamente críticas para o cenário de instabilidade.

A análise conjunta dos dados de chuva, dos tensiômetros e da curva de retenção de água no solo foi realizada para relacionar a frente de umedecimento no tempo, de acordo com a precipitação ocorrida e a condição de saturação do maciço. Como resultado, cerca de 89,2% dos valores de umidade volumétrica, em todas as profundidades estudadas, ficaram entre 30,0 e 50,0%, e cerca de 28,9% das medidas *in situ* encontravam-se com grau de saturação de 100,0%. Conclui-se que no evento 1 analisado, para saturar o primeiro metro do solo foi necessária uma precipitação de 35,4 mm/dia juntamente com um acumulado de 39 mm em 72 horas, ou um acumulado de 74,6 mm em 5 dias. Sendo assim, chuvas fracas à moderadas, porém agindo em um longo período de tempo possuem uma tendência a infiltração, o que mantém a alta umidade no maciço e, conseqüentemente, maiores valores de poro pressão, podendo influenciar diretamente na estabilidade do maciço.

Através do evento 2 selecionado, observou-se que o efeito das chuvas no acréscimo da umidade do solo devido a infiltração foi altamente influenciado pelas condições iniciais do solo, que por sua vez, são caracterizadas pelos eventos antecedentes de chuvas. Porém, o evento 3 da análise integrada demonstrou que

chuvas fortes e de curta duração são suficientes para destruir as forças de sucção nos primeiros 90 cm de solo, sendo os incrementos de poro pressão dissipados dentro de cerca de cinco dias, o que depende da permeabilidade do maciço. No evento 4 houve a redistribuição da umidade ao longo da profundidade dias após a saturação superficial, em decorrência da infiltração da chuva. Ou seja, após um evento extremo de alta intensidade e grande acumulado de precipitação os processos de fluxo interno continuaram a ocorrer, mesmo quando as chuvas cessaram. Com isso, pode ocorrer a ruptura do maciço - em decorrência da redução da sucção - algum tempo após o término do evento pluviométrico. Apesar da simplicidade, esta análise permitiu avaliar a ordem de grandeza das variações de umidade superficial esperadas no perfil.

Para a análise hidrodinâmica do comportamento do talude frente à eventos pluviométricos, realizou-se a modelagem numérica do talude. No modelo analisado, ocorreu maior variação no valor de poro pressão do solo devido à infiltração da chuva nos cenários 3 e 4 de baixa intensidade e longa duração, quando comparados com os eventos 1 e 2 de alta intensidade e curta duração. Com o maior tempo de duração do evento chuvoso, o solo se mantém mais úmido por mais tempo, apresentando uma tendência à infiltração, mesmo para precipitações de baixa intensidade.

Apesar dos acumulados dos cenários 6 e 7 serem similares ao do cenário 8, nos dois primeiros possivelmente ocorre maior escoamento superficial, pois a ocorrência de uma grande altura de chuva num curto período de tempo afeta a capacidade de infiltração do solo superficial. Destaca-se também que a condição inicial de umidade do solo apresentou grande influência nos resultados. Isto porque as chuvas de curta duração e alta intensidade dos cenários 7 e 8, ao serem aplicadas sobre os acumulados de chuva dos cenários 3 e 4, resultaram em um cenário de menor sucção inicial, ocasionando maiores profundidades de infiltração, além da saturação do solo em diversos pontos.

Em relação à análise de estabilidade, a obtenção do fator de segurança menor que o mínimo (1,5) foi condicionada à ocorrência de grandes acumulados de chuva, associados à uma precipitação de alta intensidade. O fator de segurança crítico foi encontrado no cenário de chuvas muito extremas, em que ocorreu um acumulado de precipitação de 230,4 mm em 30 dias associados com um evento pontual de 174,40 mm/d, ou ainda, um acumulado de 405,21 mm em um mês. De acordo com a análise dos dados pluviométricos, a maior média mensal registrada pela série histórica foi aproximadamente 397 mm, registrada no mês de janeiro de 2010. Dito isto, conclui-

se que os fatores de segurança estimados estão condizentes com a realidade registrada no local.

Vale destacar que os resultados encontrados - principalmente para os fatores de segurança - estão condicionados à limitação dos dados disponíveis, à dispersão e variabilidade dos dados geotécnicos, e às limitações, hipóteses e condições definidas nos modelos utilizados. Além disso, a complexidade dos processos envolvidos num cenário de instabilidade faz com que os limites críticos de precipitação que ocasionam MGM's possam variar de forma inesperada para os mesmos locais, podendo ocorrer deslizamentos em regimes de chuva inferiores aos já suportados anteriormente pelo local. Em contrapartida, a ocorrência de um elevado índice de pluviosidade é condição necessária, mas nem sempre é suficiente para o desencadeamento de deslizamentos.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O local estudado tem potencial para o desenvolvimento permanente de pesquisas e, para a extensão e aprimoramento dos resultados obtidos, sugere-se para trabalhos futuros:

- Considerar a influência da vegetação na estabilidade do maciço inclinado, pois, como visto na revisão bibliográfica, a presença de árvores e plantas ocasionam situações que contribuem nas parcelas de resistência e de sollicitação mecânica;
- Estudar a interação da superfície do solo com aspectos climáticos, tais como o *run-off* (escoamento superficial) e variação da temperatura (evaporação);
- Analisar a influência dos materiais orgânicos presentes no maciço, tais como a glomalina e as hifas de fungos, que podem aumentar a resistência mecânica do solo, agindo como aglutinantes;
- Realizar bateria de ensaios de diferentes tipos para melhor e completa caracterização do maciço, tais como os ensaios geofísicos (GPR, eletrorresistividade, sísmicos, entre outros), que são métodos indiretos de investigação do subsolo, não-invasivos e não-destrutivos. Pode-se também realizar ensaio do penetrômetro, SPT, minidisco, entre outros;

- Instalar instrumentos como forma de analisar e monitorar o comportamento do talude frente à níveis de tensão, deslocamento (inclinômetros), e de aferição do nível d'água (piezômetros). Pode-se também instalar tensiômetros em outros lugares e outras profundidades, com fins de gerar maior série histórica de leitura dos dados.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457:2016. **Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459:2016 (Versão corrigida: 2017). **Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6502:1984. **Rochas e solo**. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180:2016. **Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181:1984. **Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 11682:2009. **Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro, 2009.

ABRAMENTO, M.; CARVALHO, C. S. **Geotechnical parameters for the study of natural slope instabilization at Serra do Mar Brazil**. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, 1989.

ASTM (American Society for Testing Materials). D 5298-03: **Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper**. West Conshohocken, Pennsylvania, 2003. 08 f.

ASTM (American Society for Testing Materials). D 3080-98: **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania. 1998.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. **Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**, v. II. Rio de Janeiro, 1992. f. 721-733.

AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais - proposta de um sistema de previsão**: aplicação na área urbana de Campos do Jordão, SP. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. 390 p., 2005.

AYALEW, L.; *et al.* Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. **Engineering geology**, v. 81, n. 4, f. 432-445, 2005.

AZEVEDO, J. A. de; SILVA, E. M. da. **Tensiômetro**: dispositivo prático para controle da irrigação. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 33 f.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. **Precipitação**. In: TUCCI, C.E.M. Hidrologia Ciência e Aplicação. Cap. 5, f. 177-241. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1993.

BICALHO, K. V.; MACHADO, S. L.; GERSCOVICH, D. M. S. **Condutividade hidráulica e fluxo em solos não saturados**. In: CARVALHO, J. C *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 12, f. 297-326. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

BIGARELLA, J.J. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis, Santa Catarina. **Editora da UFSC**. v. 3, p. 884-1436. 2003.

BORA, Celso Felipe. **Análise de estabilidade de uma encosta da Serra do Mar paranaense**: Influências da consideração da poro pressão e do fluxo em meio não saturado. 2015. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2015.

BORMA, L. de S.; GITIRANA Jr., G. de F. N.; LUIZ, G. C. **Interação solo-planta-atmosfera e o papel dos solos não saturados**. In: CARVALHO, J. C *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 13, f. 327-365. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

BURGOS, P. C.; CONCIANI, W. **Índices físicos, textura, consistência e classificação de solos**. In: CARVALHO, J. C *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 08, p. 181-204. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

CAMPOS, T. M. P. de C.; MOTTA, M. F. B. **Resistência ao cisalhamento de solos não saturados**. In: CARVALHO, J. C *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 17, p. 465-497. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. D. B. da. **Infiltração**. In: CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. D. B. da. Hidrologia. Cap. 05, p 60-80. São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap5-INF.pdf>>. Acesso em 28 de maio de 2019.

CARVALHO, J. C. de; *et al.* **Considerações sobre as propriedades e comportamentos dos solos não saturados**. In: CARVALHO, J. C *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 26, p. 733-759. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

CHEN, H.; LEE, C. Geohazards of slope mass movement and its prevention in Hong Kong. **Engineering Geology**. v. 76. f. 3-25, 2004.

CHEN, L.E; YOUNG, M.H. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces. **Water Resources Research**. v. 42, n. 7. f. 1-9, 2006.

COORDENADORIA ESTADUAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL. **Anuário da Defesa Civil do Paraná: Ações Desenvolvidas em 2017**. Realização: CEPED/PR e Funespar. Curitiba, 2018.

COSTA NUNES, A. J. de. Landslides in Soil of decomposed rock due intense rainstorms. **Proceedings of International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, v. II. México. f. 547-554, 1969.

CRED, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. **Cred Crunch 48: Disaster data: A balanced perspective**. n. 48. Belgium, 2017. Disponível em: <https://www.preventionweb.net/files/54914_credcrunch48.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2018.

CRED, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. **Cred Crunch 50: Natural disasters in 2017 - Lower mortality, higher cost**. n. 50. Belgium, 2018. Disponível em: <<https://www.emdat.be/publications>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

CRED, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters; UNISDR, United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **The human cost of weather related disasters: 1995-2015**. Brussels, 2015. Disponível em: <<https://www.cred.be/index.php?q=HCWRD>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo, Cengage Learning. Tradução da 8ª edição norte-americana. 610 f. 2014

DENARDIN, J.; FREITAS, P. L. Características fundamentais da chuva intensa no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, p. 1409-1416. 1982.

FAGUNDES, J. R. T. **Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. 397 f (v.1); 47 f.(v.2).

FARIAS, M. M. **Modelagem tridimensional e estudo de estabilidade com abordagem probabilística de uma encosta da Serra do Mar**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2013. 158 f.

FENDRICH, R. **Chuvas Intensas para Obras de Drenagem no Estado do Paraná**. Curitiba, v. 1, Edição da Champagnat, 99 p. 1998.

FENDRICH, R. **Chuvas Intensas para Obras de Drenagem no Estado do Paraná, Curitiba**. v. 2, Gráfica Vicentina Editora Ltda, 101 p. 2003.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. do. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Bertrand, Rio de Janeiro, 1996. f. 123-194.

FERREIRA, K. S. de MATOS. **Análise hidromecânica de um talude rodoviário composto por solo residual no trecho de Serra do Mar da BR-376/PR**. 2017. 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2017.

FERREIRA, S. C. **Caracterização dos processos deflagradores de movimentos gravitacionais de massa durante a catástrofe de março/2011 no município de Antonina-PR**. 2012. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

FIERZ, M. M. A teoria do equilíbrio dinâmico em geomorfologia. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 19, n. 3, f. 605-629, 2016. ISSN 2179-0892. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/107614>>. Acesso em: 03 abr. 2018.

FREDLUND, D. G. Unsaturated soil mechanics in engineering practice, The 2005 Terzaghi Lecture: **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, n. 132, v.3. f. 286-321. 2006.

FREDLUND, D. G. Use of the soil-water characteristic curve in the implementation of unsaturated soil mechanics, **Third International Conference on Unsaturated Soils**, UNSAT 2002, Recife, Brazil, v. III, f. 887-902. 2002.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, n. 103, v. 5. f. 447-466. 1977.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The shear strength of unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**. n. 15, v. 3. f. 313–321. 1978.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. Soil mechanics for unsaturated soil. **Jonh Wiley & Sons**. New York, 517 f. 1993.

FREDLUND, D.G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**. n. 31. v. 3. f. 521-532. 1994

FREDLUND, D. G., XING, A.; HUANG, S. Prediction the permeability functions for unsaturated soil using the soil water characteristics curve. **Canadian Geotechnical Journal**. n. 4, v. 31. f. 533-546. 1994.

FUTAI, M. M.; SUZUKI, S. Estudo de retenção de água e infiltração em solos tropicais coluvionares e residuais. **Symposium**. Recife, v. 14, f. 23-47, 2010.

GEOPLANEJAMENTO, Pesquisa Mineral e Geologia Ambiental LTDA. **Mapeamento Geológico-Geotécnico da porção leste da Serra do Mar do estado do Paraná**. 2011. Relatório Final – Voume I – Texto. Curitiba, 2011. 91 f.

GERSCOVICH, D. M. S.; VARGAS Jr. E. do A.; T. M. P.; CAMPOS de. **Estabilidade de Taludes**. In: CARVALHO, J. C *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 22., p. 613-632. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

GERSCOVICH, D.M.S. **Estabilidade de Taludes**. Oficina de Textos. 166 f. 2012.

GITIRANA Jr., G. F. N., MARINHO, F. A. M. e SOTO, M. A. A. **A curva de retenção de água de materiais porosos**. In: CARVALHO, J. C *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 9., p. 205-229. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

GITIRANA, Jr., G.F.N. e FREDLUND, D.G. Soil-water characteristic curve Equation with independent parameters. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. ASCE, n. 130, v.2. f. 209-212, 2004.

GODOY, L. **Aplicação do modelo Shalstab no mapeamento de áreas susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa, na Bacia do Rio Marumbi, Serra do Mar, Paraná**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal Do Paraná, Pato Branco, 2015.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M.; SANTOS, I. dos. Hidrogeomorfologia: princípios, conceitos, processos e aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, n.2, f.103-111, 2012.

GONÇALVES, L. S. **Relações intensidade-duração-frequência com base em estimativas de precipitação por satélite**. 2011. 117 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

GONZÁLEZ, A. A. M. **Simulação geológico-geotécnica para avaliação de estabilidade de taludes a partir de técnicas de geoprocessamento**. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, PR. 2017.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. Edgard Blucher, 1ª edição. São Paulo, 1984. 196 f.

GUMBEL, E. J. Probability tables for the range. **Biometrika**, v. 36, n° ½. p. 142 - 148. 1949.

HIGHLAND, L.M.; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook: A guide to understanding landslides**. Reston, Virginia, 2008. U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 f. 2008.

HILLEL, D. Soil and Water: Physical Principles and Processes. **Academic Press**. New York, 1971. 288 f.

HUTCHINSON, J.N. Mass movement. **Encyclopedia of geomorphology**. ed. R. W. Fairbridge. New York. Reinhold Book Corp. f. 688–696. 1968.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Análise de um evento de chuva intensa no litoral entre o PR e nordeste de SC**. 2011. Disponível em <<http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/16905>>. Acesso em: 14 abr. 2018.

IVERSON, R.M. Landslide triggering by rain infiltration. USGS. **Water Resources Research**, v. 36, n. 7, p. 1897-1910. 2000.

- JESUS, A. S. de; *et al.* **Influência de aspectos geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos e da cobertura vegetal no estado de saturação do solo.** In: CARVALHO, J. C *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 5., p. 97-124. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.
- KIM, I. S.; DUQUIA, C. G.; CALVETTI, L. Regionalização do Estado do Paraná com utilização dos campos de precipitação, temperatura mínima e máxima. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia.** 2000.
- KIM, J.; JEONG, S.; PARK, S.; SHARMA, J. Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. **Engineering Geology**, v. 76. f. 251-262. 2004.
- LACERDA, W. A.; SANDRONI, S. S. **Movimentos de massa coluviais. Mesa redonda sobre aspectos geotécnicos de encostas.** Clube de Engenharia. Rio de Janeiro, 1985.
- LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. **Soil Mechanics.** John Wiley & Sons Inc. New York, 1969. 553 f.
- LEITE, M.L.; ADACHESKI, P.A.; VIRGENS, J.S. Análise da frequência e da intensidade das chuvas em Ponta Grossa, Estado do Paraná, no período entre 1954 e 2011. **Acta Scientiarum Technology.** Maringá, v. 33, n. 1, p. 57-64, 2011.
- LI, Y.; MA, C.; WANG, Y. Landslides and debris flows caused by an extreme rainstorm on 21 July 2012 in mountains near Beijing, China. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, f. 1-16, 2017.
- LIMA, R. M. T. **Estudos de movimentos de massa gravitacionais, Processos erosivos e áreas sujeitas a Inundações na área urbana de Antonina, litoral do Paraná - Escala 1:10.000.** 2001. 195 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2001.
- LISTO, F. de L. R. **Propriedades geotécnicas dos solos e modelagem matemática de previsão a escorregamentos translacionais rasos.** 2015. 167 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) -Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- LOPES, F. C. A. **Avaliação da influência da distribuição espacial da espessura do solo e do nível freático na estabilidade de encosta.** 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2013.
- LYU, H. M.; SHEN, J. S.; ARULRAJAH, A. Assessment of geohazards and preventative countermeasures using AHP incorporated with GIS in Lanzhou, China. **Sustainability.** 10.2, 2018. f. 304.
- LYU, H. M.; WANG, G. F.; SHEN, J.S.; LU, L. H.; WANG, G. Q. Analysis and GIS Mapping of Flooding Hazards on 10 May 2016, Guangzhou, China. **Water**, 2016. 8, f. 447.

MACHADO, S. L.; VILAR, O. M. **Potenciais da água no solo**. In: CARVALHO, J. C *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 4., p. 79-96. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

MARCHI, L. P. de; PICANÇO, J. de L. **Análise do maciço rochoso no Morro do Bom Brinquedo, e sua relação com os deslizamentos de março/2011 em Antonina-PR**. XX Congresso Interno de Iniciação Científica da Unicamp. 2012.

MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A; GITIRANA Jr., G. de F. N. **Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção**. In: CARVALHO, J. C *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. Cap. 10, p. 231-256. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

MINEROPAR, Minerais do Paraná S.A. **Avaliação geotécnica de vertentes na área urbana de Antonina**. Curitiba, 2013. 2 v. Conteúdo: v.1. Texto, v.2. Mapas.

MILLAN COY, Y. S. **Avaliação da suscetibilidade das vertentes de um trecho da BR-376, entre os km 658+820 m e 660+690 m, PR**. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, PR. 2015.

MONTOYA, C. A. H. **Incertezas, Vulnerabilidade e Avaliação de Risco Devido a Deslizamento em Estradas**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-081/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 250 p, 2013.

MOSCATELI, Douglas Correia. **Taludes estabilizados por retroanálise-análise crítica e comparação com métodos tradicionais de análise de equilíbrio limite**. 2017. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2017.

MUNICH RE. **Topics Geo 2014**: Natural catastrophes 2014, Analyses, assessments, positions. München, Germany: Sabine Twest, Munich Re, 2015. Disponível em: <https://www.munichre.com/site/corporate/get/documents_E1018449711/mr/assetpool.shared/Documents/5_Touch/_Publications/302-08606_en.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2018.

PFAFSTETTER, O. **Chuvas Intensas no Brasil**: Relação entre Precipitação, Duração e Frequência de Chuvas. Departamento Nacional de Obras e Saneamento, Rio de Janeiro. 426 p, 1982.

POPESCU, M. E. Landslide causal factors and landslide remedial options. In: **3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures**. Singapore, 2002.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ANTONINA. **História**. Paraná, Brasil. Disponível em: <http://antonina.pr.gov.br/pagina/78_Historia.html>. Acesso em: 02 jul. 2019.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D.L. e MILLER, N. Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data. **ASCE, Hydraulic Engineering**. 1983. n. 109. f. 62-70.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades física do solo**. Universidade Federal de Santa Maria - Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2006. Disponível em:

<https://www.agro.ufg.br/up/68/o/An_lise_da_zona_n_o_saturada_do_solo__texto.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2018.

SILVA, D. D.; GOMES FILHO, R. R.; PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; NOVAES, L. F. Chuvas Intensas no Estado da Bahia, Campina Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 6. n° 2. p. 362-367. 2002.

SILVA, W.P. et al. LAB Fit Ajuste de Curvas: Um software em português para tratamento de dados experimentais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 26, n° 4. p. 419-427. 2004.

SMITH, P. G. C.; ADDENBROOKE, T. I.; POTTS, D. M. Coupled finite analysis of infiltration into unsaturated soils. **Proceedings of 3th International Conference on Unsaturated Soils**, v. 1. Recife, 2002. f. 03-07.

SOUZA, W.M, AZEVEDO, P.V., ARAÚJO, L.E. Classificação da Precipitação diária e impactos decorrentes dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**. V. 02, p. 250-268, 2012.

SOTO, M. A. A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados**. Tese (Doutor em Geotecnia). Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2004. 206 f.

TABALIPA, N.L.; FIORI, A.P. Influência da vegetação na estabilidade de taludes na bacia do rio Ligeiro (PR). **Geociências**. v. 27, n. 3. f. 387-399, UNESP, 2008.

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de taludes: Avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar Paranaense**. 2009. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2009.

TORRICO, J. J. T. **Práticas hidrológicas**. Rio de Janeiro, Transcom. 120 p., 1974.

VANAPALLI, S. K.; LOBBEZOO, J. P. A simple technique for estimating the coefficient of permeability of unsaturated soils. **55th Canadian Geotechnical Conference Canada**. 2002.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. Th., F. J. Leij, and S. R. Yates. **The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0**. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California. 1991.

VANHONI, F.; MENDONÇA, F. A. O Clima do litoral do estado do Paraná. **Revista de Climatologia**, n. 3/4. f. 49-64. 2008.

VARGAS, M. The concept of tropical soils (Brazilian Society for Soil Mechanics). **1st International Conference on Geomechanics in Tropical Laterite and Saprolitic Soils**, v.3. Brasília, 1985. f. 101–134.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. **S. KRIZEK (ed) Slope movement types and processes**. Washington, 1978. f. 11-33.

VICTORINO, M. M. **Influência da chuva nas poro pressões e estabilidade dos taludes rodoviários de um trecho da BR-376 na Serra do Mar Paranaense**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, PR. 2015.

VIEIRA, D. B. Análise das máximas intensidades de chuvas na cidade de Campinas. **Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos**. p. 375-386, 1981.

VOGT, V. **Avaliação das propriedades geotécnicas de uma encosta coluvionar no oleoduto Araucária-Paranaguá (OLAPA)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, PR. 2012.

WANG, G.; SASSA, K. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: Effects of grain size-particle content. **Engineering Geology**, vol. 69, f. 109-125. 2003.

WOLLE, C. W. **Análise de escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de Instabilização de Encostas**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1988. 340 f.

YOMURA, D. M. **Análise de estabilidade de talude coluvionar da Serra do Mar do Paraná considerando diferentes condições de fluxo no subsolo**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2008.

ZARUBA, Quido; MENCL, Vojtech. Landslides and their control. **Developments in Geotechnical Engineering**. Elsevier: Academia, v.31. Prague, 1969. 324 f.

ZUQUETTE, L. V.; PEJON, O. J. Eventos perigosos geológico-geotécnicos no Brasil. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS**. Florianópolis, 2004. f. 312-336.