

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CELSO FELIPE BORA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UMA ENCOSTA DA SERRA DO MAR  
PARANAENSE: INFLUÊNCIAS DA CONSIDERAÇÃO DA POROPRESSÃO E DO  
FLUXO EM MEIO NÃO SATURADO**

CURITIBA

2015

CELSO FELIPE BORA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UMA ENCOSTA DA SERRA DO MAR  
PARANAENSE: INFLUÊNCIAS DA CONSIDERAÇÃO DA POROPRESSÃO E DO  
FLUXO EM MEIO NÃO SATURADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração em Geotecnia, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Christopher Morales Kormann.

CURITIBA

2015

---

B726a

Bora, Celso Felipe

Análise de estabilidade de uma encosta da Serra do Mar paranaense :  
influências da consideração da poropressão e do fluxo em meio não saturado/  
Celso Felipe Bora. – Curitiba, 2015.  
152 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,  
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, 2015.

Orientador: Alessander Christopher Morales Kormann .  
Bibliografia: p. 143-152.

1. Taludes (Geografia física) - Estabilidade. 2. Água do solo. 3. Succção. I.  
Universidade Federal do Paraná. II.Kormann, Alessander Christopher  
Morales. III. Título.

CDD: 551.81

---

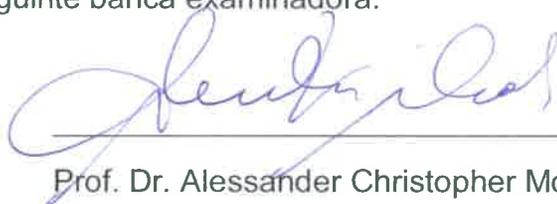
## TERMO DE APROVAÇÃO

CELSO FELIPE BORA

### ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UMA ENCOSTA DA SERRA DO MARPARANAENSE: INFLUÊNCIAS DA CONSIDERAÇÃO DE FLUXO EM MEIO NÃO SATURADO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Geotecnia, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Alessander Christopher Morales Kormann

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Construção Civil - UFPR

Examinadores:



Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Construção Civil - UFPR



Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP

Curitiba, 21 de maio de 2015

Aos meus pais, Celso e Joice Bora.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

Aos meus pais, Celso e Joice, pelo amor incondicional.

Ao Professor Dr. Alessandro C. M. Kormann, pela orientação, amizade e conhecimentos transmitidos durante a elaboração deste trabalho.

A Professora Dr<sup>a</sup>. Andrea Sell Dyminski (*in memoriam*), por todo o incentivo, apoio e motivação.

Aos meus colegas da Egis Engenharia e Consultoria Ltda.

Aos colegas da turma de 2013 e a todos os Professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia da Construção Civil.

As pessoas que de alguma forma estiveram ao meu lado e acreditaram neste sonho.

À UFPR, pela oportunidade, muito obrigado.

“Seja a mudança que deseja ver no mundo.”

*Mahatma Gandhi*

## RESUMO

A água possui papel fundamental na maioria dos deslizamentos de encostas, seja por meio de incremento de esforços solicitantes ou pela sua participação na redução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo. Sabe-se que a redução da sucção é um dos principais motivos associados aos deslizamentos de solos não saturados. Com base neste contexto selecionou-se uma região localizada nas margens da BR-277, no município de Morretes/PR, como plataforma experimental da pesquisa. O objetivo principal desta dissertação foi avaliar do impacto que a consideração da poropressão e do fluxo tem nos fatores de segurança da encosta. Buscando verificar até que ponto níveis crescentes de análise de estabilidade e fluxo se justificam sob o ponto de vista prático da engenharia. De forma a caracterizar o comportamento hidráulico do solo, ensaios para a determinação da curva de retenção foram realizados, identificando e definindo as principais características hidráulicas dos materiais envolvidos. Foram determinadas 3 curvas de retenção através da medição de 48 pontos de sucção. O método utilizado para a definição das curvas de retenção foi a técnica do papel filtro. As análises de fluxo foram realizadas no programa Seep/W através do método dos elementos finitos, enquanto as análises de estabilidade foram conduzidas no Slope/W através da teoria do equilíbrio limite. Os resultados obtidos nas análises de fluxo e estabilidade confirmam a importância da sucção na estabilidade de encostas. Já para as análises de fluxo estacionário e transiente, os valores encontrados retornaram fatores de segurança muito próximos a condição sem percolação.

**Palavras-chave:** Análise de estabilidade, Solo não saturado, Sucção.

## ABSTRACT

Water has key role in most landslides, either through increase of internal forces or its participation in the reduction of strength parameters at ground shear. It is known that the reduction of suction is one of the main reasons associated with unsaturated soils slips, based in this context was selected a region located on the banks of the BR-277 (highway), in Morretes city (Paraná State), as an experimental platform research. The main objective of the research was evaluate the impact that poropressure consideration and water flow has on the slope safety factors. In order to verify the extent to which increasing levels of stability analysis and flow justified from a practical point of view of engineering. Seeking to characterize the hydraulic behavior of the soil tests to determine the release curves were performed, identifying and defining the main hydraulic characteristics of the materials involved. It was determined 3 retention curves by measuring 48 points suction. The method used for determination of retention curves was the technique of filter paper. The flow analyzes were performed at the Seep/W program using the finite element method, while the stability analyzes were conducted in Slope/W through the limit equilibrium theory. The results obtained from the flow and stability analyzes confirm the importance of suction on the stability of slopes. As for the analyzes of the stationary and transient flow the values found return safety factors very close of the condition without the percolation.

**Key words:** Stability analysis, Unsaturated soil, Suction.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	21
1.2 OBJETIVO .....	23
1.3 JUSTIFICATIVA.....	24
1.3.1 Ambiental.....	25
1.3.2 Social.....	25
1.3.3 Econômica .....	25
1.4 LIMITAÇÕES .....	26
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	26
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>27</b>
2.1 INFLUÊNCIA DA CHUVA NA ESTABILIDADE DE TALUDES .....	27
2.2 PROPRIEDADES DOS SOLOS NÃO SATURADOS.....	28
2.2.1 Introdução.....	28
2.2.2 Potencial da água no solo .....	29
2.2.3 Medição e determinação da sucção.....	31
2.2.4 Curva retenção .....	33
2.2.5 Coeficiente de permeabilidade de solos não saturados .....	37
2.2.6 Métodos para análise de estabilidade de taludes.....	40
2.2.7 Resistência ao cisalhamento dos solos não saturados .....	41
2.3 ENCOSTAS NATURAIS.....	44
2.3.1 Deslizamentos de massa.....	45
<b>CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>50</b>
3.1 LOCALIZAÇÃO E EVIDÊNCIAS .....	50
3.1.1 Aspectos geológicos.....	52
3.1.2 Histórico de movimentações.....	57
3.1.3 Descrição das causas da ruptura .....	60
3.2 TRABALHOS ANTERIORES.....	60
3.2.1 Investigações geotécnicas.....	61
3.2.2 Ensaio de laboratório com as amostras coletadas .....	68
3.3 ENSAIOS COMPLEMENTARES.....	73
3.3.1 Curva de retenção .....	73
<b>CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>82</b>
4.1 GEOMETRIA DA ENCOSTA.....	82

4.2 DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	86
4.3 INSTRUMENTAÇÃO.....	90
4.4 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS.....	96
4.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO E PARÂMETROS HIDRÁULICOS.....	97
4.6 HIPÓTESES DE ESTABILIDADE.....	104
4.7 CENÁRIOS.....	104
4.7.1 Cenário 1.....	105
4.7.2 Cenário 2.....	106
4.7.3 Cenário 3.....	106
4.7.4 Cenário 4.....	107
4.8 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	107
4.8.1 Programa <i>Seep/W</i> .....	107
4.8.2 Programa <i>Slope/W</i> .....	108
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS.....</b>	<b>109</b>
5.1 PERFIS DE PRESSÃO DA ÁGUA DURANTE A INFILTRAÇÃO.....	109
5.2 CENÁRIO 1.....	115
5.3 CENÁRIO 2.....	117
5.4 CENÁRIO 3.....	118
5.5 CENÁRIO 4.....	121
5.6 AVALIAÇÃO DE PRECIPITAÇÕES ANTECEDENTES.....	136
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>138</b>
6.1 ASPECTOS RELACIONADOS AOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	138
6.2 ASPECTOS RELACIONADOS AOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	139
6.3 TRABALHOS FUTUROS.....	142
<b>CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>143</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Infraestrutura de produção e movimentação de petróleo e seus derivados. Fonte: Brasil (2014).....	22
Figura 2 – Curva de retenção típica para um solo siltoso. Fonte: adaptada de Fredlund e Xing (1994).....	33
Figura 3 – Curvas de retenção típicas para diferentes solos. Fonte: adaptado de Fredlund e Xing (1994). ....	34
Figura 4 – Curva de retenção para solos tropicais. Fonte: Feuerharmel <i>et al.</i> (2004). 35	
Figura 5 – Histerese. Fonte: Miqueletto (2007). ....	36
Figura 6 – Curvas de retenção de água e condutividade hidráulica para um solo arenoso. Fonte: Fredlund (1994). ....	38
Figura 7 – Superfície de ruptura influenciada pela sucção. Fonte: Adaptado de Lu e Likos (1994) <i>apud</i> Miqueletto (2007)).....	43
Figura 8 – Esquema de mantos de intemperismo. Fonte: Townsend (1985) <i>apud</i> Suzuki (2004)).....	44
Figura 9 – Queda ou desprendimento. Fonte: adaptado de USGS (2009). ....	46
Figura 10 – Tombamento. Fonte: adaptado de USGS (2009).....	46
Figura 11 – Escorregamento: (a) rotacional; (b) translacional. Fonte: adaptado de USGS (2009).....	47
Figura 12 – Espalhamento. Fonte: adaptado de USGS (2009).....	48
Figura 13 – Rastejo ( <i>Creep</i> ). Fonte: adaptado de USGS (2009). ....	48
Figura 14 – Corridas: (a) de detritos; (b) de terra. Fonte: adaptado de USGS (2009). 49	
Figura 15 – Localização. Fonte: adaptado de Nunes (2002).....	50
Figura 16 – Região de estudo – Morretes/PR. ....	51
Figura 17 – Mapa de cicatrizes de escorregamentos. Fonte: adaptado de Nunes (2002). .....	52
Figura 18 - Mapa geomorfológico parcial do litoral do estado do Paraná. Fonte: Mineropar (2014).....	53
Figura 19 - Mapa geomorfológico da área de estudo.....	54
Figura 20 – Localização da área no mapa geológico. Fonte: Mineropar (2014). ....	56
Figura 21 – Trincas superficiais. Fonte: Vogt (2012).      Figura 22 – Ruptura do duto. Fonte: Suzuki (2004).....	58
Figura 23 – Histórico de movimentações. ....	59

Figura 24 – Modelo geotécnico de rastejo com falhas gravitacionais. Fonte: adaptado de Cenpes (2001). .....	60
Figura 25 – Planta de locação das sondagens e coletas de amostras indeformadas. Fonte: adaptado de Ufpr (2013). .....	63
Figura 26 – Coletas de amostras indeformadas. Fonte: Vogt (2012). .....	65
Figura 27 – Coletas de amostras indeformadas. Fonte: Ufpr (2013). .....	66
Figura 28 – Coletas de amostras indeformadas. Fonte: Vogt (2012). .....	70
Figura 29 – Envoltórias de resistência. Fonte: Vogt (2012). .....	72
Figura 30 – Amostras indeformadas. ....	74
Figura 31 – Incremento de umidade – ensaio de sucção. ....	75
Figura 32 – Corpos de prova – ensaio de sucção. ....	76
Figura 33 – Processos – ensaio de sucção. ....	77
Figura 34 – Curvas de retenção ajustadas por Fredlund e Xing (1994). ....	79
Figura 35 – Seção de análise. Fonte: adaptado de Farias (2013). ....	83
Figura 36 – Região superior e inferior da encosta. ....	83
Figura 37 – Seção estratigráfica. Fonte: adaptado de Ufpr (2013). ....	85
Figura 38 – Histograma de pluviometria mensal. ....	86
Figura 39 – Histogramas de pluviometria. ....	88
Figura 40 – Chuva de projeto. ....	89
Figura 41 – Instrumentação. Fonte: adaptado de Ufpr(2013). ....	91
Figura 42 – Linha freática média. ....	95
Figura 43 – Malha de elementos finitos e seção de medição de poropressão. ....	98
Figura 44 – Perfil de poropressão inicial. ....	99
Figura 45 – Equalização dos níveis de sucção. Fonte: Geo-Studio (2004). ....	100
Figura 46 – Perfil de sucção inicial. ....	101
Figura 47 – Curva de retenção A3 ajustada pelo método Fredlund e Xing (1994). ...	103
Figura 48 – Curva de permeabilidade não saturada A3 ajustada pelo método Van Genuchten (1980). ....	103
Figura 49 – Cenários analisados. ....	105
Figura 50 – Perfis de sucção durante o processo de infiltração. Fonte: Zhang <i>et al.</i> (2004). ....	110
Figura 51 – Condutividade hidráulica do solo e precipitações analisadas. ....	111
Figura 52 – Perfil de poropressão ao longo do tempo, $K_s=1,10e^{-5}$ m/s, precipitação de 1, 20 e 40 mm/h. ....	113
Figura 53 – Perfil de poropressão ao longo do tempo, $K_s=1,10e^{-5}$ m/s, precipitação de 1 mm/h, duração de até 3000 h, ou 125 dias. ....	114
Figura 54 – Seção de análise importada para o Slope/W. ....	116

Figura 55 – Cenário 1, região superior.....	116
Figura 56 – Cenário 1, região inferior.....	117
Figura 57 – Cenário 2, região superior.....	117
Figura 58 – Cenário 2, região inferior.....	118
Figura 59 – Distribuição das poropressões e fluxo.....	119
Figura 60 – Cenário 3, região superior.....	120
Figura 61 – Cenário 3, região inferior.....	120
Figura 62 – Perfis de poropressão – Análise transiente.....	126
Figura 63 – Perfis de poropressão agrupados – Análise transiente.....	127
Figura 64 – Análises de estabilidade dos 20 dias – Região Superior.....	131
Figura 65 – Análises de estabilidade dos 20 dias – Região Inferior.....	134
Figura 66 – Precipitação <i>vs</i> Fator de segurança – Região Superior.....	135
Figura 67 – Precipitação <i>vs</i> Fator de segurança – Região Inferior.....	135
Figura 68 – Avaliação da precipitação antecedente – Região Superior.....	137
Figura 69 – Avaliação da precipitação antecedente – Região Inferior.....	137

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos experimentais para a determinação ou controle da sucção. Fonte: Vilar (1987).....	32
Tabela 2 – Métodos de curva de retenção propostos. Fonte: Peixoto (2011).....	37
Tabela 3 – Síntese dos modelos de funções de condutividade hidráulica. Fonte: Peixoto (2011).....	39
Tabela 4 – Características dos métodos de equilíbrio limite. Fonte: Geo-Slope (2007).....	41
Tabela 5 – Informações dos pontos de investigação geotécnica. Fonte: adaptado de Vogt (2012). ....	62
Tabela 6 – Informações dos pontos de coleta de amostras. Fonte: adaptado de Ufpr (2013).....	67
Tabela 7 – Ensaio de caracterização – condição natural. Fonte: Vogt (2012). ....	68
Tabela 8 – Informações dos pontos de coleta de amostras. Fonte: Vogt (2012). ....	69
Tabela 9 – Classificação granulométrica. Fonte: Vogt (2012).....	71
Tabela 10 – Parâmetros de resistência. Fonte: Vogt (2012). ....	72
Tabela 11 – Parâmetros de ajustes e índices físicos. ....	80
Tabela 12 – Nível d’água da encosta. Fonte: adaptado de Ufpr(2013).....	92
Tabela 13 – Parâmetro de ajuste. ....	93
Tabela 14 – Parâmetros geotécnicos.....	96
Tabela 15 – Chuva 1 - Níveis de precipitação.....	101
Tabela 16 – Resumo das análises de estabilidade. ....	140

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Amostra Indeformada
AIT	Área de Interesse Turístico
ANP	Agencia Nacional do Petróleo
APA	Área de Proteção Ambiental
BR	Brasil
BS	<i>British Standards</i>
CENPES	Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello
DHP	Dreno Sub-Horizontal Profundo
FS	Fator de Segurança
IP	Índice de Plasticidade
LAME	Laboratório de Materiais e Estruturas
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEF	Métodos dos Elementos Finitos
MINEROPAR	Minerais do Paraná S.A
NA	Nível d'água
NBR	Normas Brasileiras
OLAPA	Oleoduto Araucária-Paranaguá
PPGECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil.
PR	Paraná

PZM	Piezômetro
SM	Sondagem Mista
SND	Sondagem
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USGS	<i>Servicio Geológico de los Estados Unidos</i>

## LISTA DE SIMBOLOS

$a$	Parâmetro de ajuste do método de Fredlund e Xing
$c'$	Coesão efetiva
cm	Centímetro
$e$	Índice de vazios
g	Gramma
h	Hora
H	Carga Total
K	Coefficiente de permeabilidade
Kg	Quilograma
Km	Quilômetro
Km <sup>2</sup>	Quilômetros quadrados
KN/m <sup>3</sup>	Quilonewton por metro cúbico
KPa	Quilopascal
m	Metro
$m$	Parâmetro de ajuste do método de Fredlund e Xing
min	Minuto
mm	Milímetro
mm/h	Milímetros por hora
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
m/s	Metro por segundo
m <sup>3</sup> /s	Metros cúbicos por segundo

$n$	Porosidade
$n$	Parâmetro de ajuste do método de Fredlund e Xing
$s$	Segundos
$S$	Grau de saturação
$t$	Tempo
$T$	Temperatura
$u$	Poropressão
$u_a$	Poropressão do ar
$u_w$	Poropressão de água
$w$	Teor de umidade gravitacional
$\alpha$	Ângulo de contato
$\chi$	Parâmetro dependente do tipo de solo e do grau de saturação
$\gamma$	Peso específico
$\gamma_w$	Peso específico da água
$\Psi$	Potencial hidráulico
$\Psi_g$	Potencial gravitacional
$\Psi_h$	Potencial hidráulico
$\Psi_m$	Potencial mátrico
$\Psi_o$	Potencial osmótico
$\Psi_p$	Potencial de pressão

$\Psi$	Potencial de temperatura
$\theta$	Teor de umidade volumétrica
$\tau$	Resistencia ao cisalhamento
$\sigma$	Tensão normal
$\phi$	Ângulo de atrito
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

As grandes obras de engenharia, entre elas as dutovias, são concebidas com a finalidade de trazer relevantes benefícios à sociedade. Segundo dados divulgados pela Agência Nacional do Petróleo - ANP, o Brasil possui 19.700 quilômetros de oleodutos e gasodutos (BRASIL, 2014), os quais transportam grande parte da produção nacional de petróleo, gás natural, derivados, entre outros componentes.

Em 2012, a infraestrutura dutoviária nacional era composta por 601 dutos destinados a movimentação. Do total de 19.700 quilômetros, 11.700 quilômetros se destinam a movimentação de gás natural, 5.900 quilômetros a movimentação de derivados de petróleo, 2000 quilômetros a movimentação de petróleo e 100 quilômetros a movimentação de outros produtos, tais como etanol e solventes.

Grande parte da malha dutoviária nacional é composta por dutos enterrados os quais atravessam as mais variadas unidades geológicas, sendo algumas destas formações complexas e instáveis sob o ponto de vista geológico-geotécnico.

Uma das regiões de grande complexibilidade é a região da Serra do Mar Paranaense, onde os elevados níveis de precipitação e os avançados perfis de intemperismo contribuem para os processos de instabilização e deslizamentos.

Na Figura 1 é apresentada a infraestrutura nacional de produção e movimentação de petróleo, onde é possível perceber a grande densidade de dutos localizados na região sul do Brasil e na região da Serra do Mar.

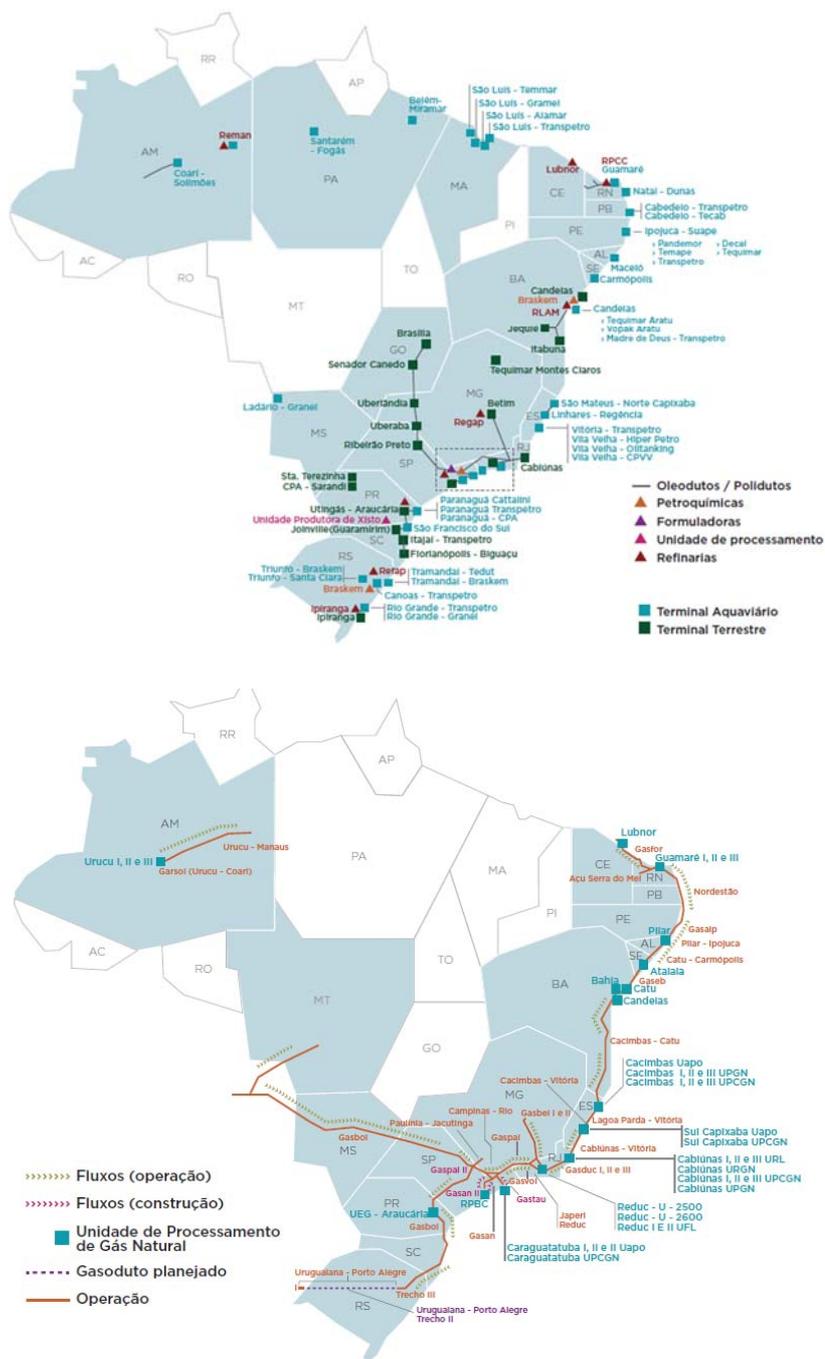


Figura 1 – Infraestrutura de produção e movimentação de petróleo e seus derivados. Fonte: Brasil (2014).

### Movimentação de Massa

Segundo Silveira (2008), os movimentos de massa são caracterizados pelo transporte de sedimentos, solo ou rocha, induzidos pela força gravitacional terrestre. Os movimentos podem ocorrer devido a fatores isolados ou conjuntos, como as intensas precipitações, desmatamentos e obras de terraplenagem.

Segundo Cardoso Jr. (2006), a precipitação está associada a maioria dos escorregamentos de terra, seja por meio de incremento de esforços solicitantes (aumento do peso específico provocado pela maior umidade do solo), ou pela sua participação na redução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (redução ou eliminação da sucção em solos não saturados).

Estudos envolvendo a estabilidade de taludes e encostas naturais, em meio não saturado, podem ser encontrados em diversas literaturas, como: Morgenstern e Mattos 1975, Wolle *et al.* 1978, Wolle 1985, Abramento e Carvalho 1989, Wolle e Carvalho 1989, Wolle e Hachich 1989, Bressani *et al.* 1997, Calle 2000, Vieira e Marinho 2001, Santos e Villar 2004a, 2004b, entre outros.

Na sequência, o tópico 1.2 descreve o objetivo do trabalho em questão, enquanto que o tópico 1.3 expõe aspectos ambientais, sociais e econômicos que justificam o estudo do tema proposto. O tópico 1.4 descreve as limitações da pesquisa. O tópico 1.5, por sua vez, descreve a estrutura da dissertação.

## 1.2 OBJETIVO

Baseado neste contexto selecionou-se uma região localizada nas margens da rodovia BR-277, no município de Morretes/PR, como plataforma experimental para o desenvolvimento desta pesquisa.

A encosta natural pertence a cadeia de montanhas da Serra do Mar e é caracterizada pela alta complexibilidade geológica-geotécnica. Nesta região encontram-se implantadas grandes obras de infraestrutura como a rodovia federal BR-277 e importantes ramais dutoviários, os quais garantem maior importância econômica à região.

Diante desta problemática, tem-se como objetivo principal desta dissertação a avaliação do impacto que a consideração da poropressão e fluxo tem nos fatores de segurança da encosta. Buscando verificar até que ponto níveis crescentes de análise se justificam sob o ponto de vista prático da engenharia.

Além do objetivo principal, pretende-se alcançar os seguintes objetivos secundários:

- ✓ Compreender a influência da poropressão na estabilidade de taludes naturais não saturados;
- ✓ Compilar, analisar e validar ensaios de campo e laboratório de estudos anteriores;
- ✓ Identificar os principais aspectos mecânicos e hidráulicos, os quais influenciam na estabilidade de taludes;
- ✓ Caracterizar geologicamente e geotecnicamente a região de estudo, através de revisão bibliográfica e ensaios de laboratório.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Segundo Pezzotta (2010), em condições ideais, os dutos enterrados estão expostos apenas aos esforços de pressão interna do fluido transportado, mas esse é apenas um dos componentes do completo estado de tensões nas paredes de um duto. Na realidade há pelo menos cinco fatores que geram tensões nas paredes dos dutos: o processo de montagem, as tensões de fabricação, as tensões do fluido e as decorrentes da interação duto com o solo.

Devido a interação direta entre o duto e o solo, o conhecimento do terreno de fundação sobre o qual os dutos estão apoiados é fundamental. Desta forma é possível prever e assim evitar acidentes os quais trariam possíveis danos ambientais, sociais e econômicos a região.

Na sequência, são apresentadas as justificativas ambientais (tópico 1.3.1), sociais (tópico 1.3.2) e econômicas (tópico 1.3.3) que incentivaram o desenvolvimento deste estudo.

### 1.3.1 Ambiental

Em fevereiro de 2001 um evento de instabilização de massa foi registrado no litoral do estado do Paraná, levando o rompimento de uma importante malha de dutos os estrado. Devido a ruptura do duto aproximadamente 50.000 litros de óleo diesel vazaram em região de serra, atingindo diversos rios, contaminando a fauna e a flora da região. A área atingida por esse desastre é de Mata Atlântica e considerada reserva da biosfera pela UNESCO (O ESTADO DO PARANÁ, 2001).

### 1.3.2 Social

Segundo Sidle e Ochiai (2006), em 1921, um evento extremo de movimentação de massa foi registrado na China. O fenômeno conhecido como corrida de material levou a instabilização de uma grande massa de solo e detritos, os quais foram responsáveis por aproximadamente 180.000 mortes.

Outro dado importante e com números expressivos foi registrado na cidade do Rio de Janeiro, entre os anos de 1986 e 1996 diversos escorregamentos foram registrados no estado, os quais resultaram na destruição de 413 residências, 1 hospital e a perda de 123 vidas. (AMARAL, 1997).

### 1.3.3 Econômica

As consequências decorrentes de um deslizamento são inúmeras e os recursos financeiros necessários para reparar os danos são altos. Segundo Farah (2003), o valor do patrimônio material destruído por instabilizações em encostas pode ser estimado na casa dos bilhões de dólares anuais em todo o mundo. Estes gastos incluem desde o custo da tentativa de resgate de eventuais sobreviventes soterrados até os altos investimentos em obras emergenciais para refrear novos escorregamentos e posterior recuperação e estabilização da encosta.

## 1.4 LIMITAÇÕES

Esta pesquisa se limita à área de estudo apresentada, podendo ter sua metodologia estendida para outras áreas que apresentem as mesmas características, mantendo sempre uma análise crítica dos resultados.

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente capítulo apresentou as considerações iniciais e motivação para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como os principais objetivos, justificativas e limitações. Os parágrafos subsequentes apresentam uma pequena descrição do conteúdo dos próximos capítulos.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre os temas associados ao desenvolvimento da dissertação, sendo dividido em três tópicos principais, a saber: influência da chuva na estabilidade de taludes, propriedades dos solos não saturados e características dos solos residuais tropicais.

O capítulo 3 apresenta a caracterização da área de estudo, bem como sintetiza todas as informações e dados de trabalhos anteriores. No mesmo capítulo apresenta-se os procedimentos utilizados para a determinação dos parâmetros hidráulicos dos materiais.

O capítulo 4 foi destinado aos materiais e métodos. Neste capítulo foram apresentadas a geometria da encosta, os dados pluviométricos, as hipóteses de pesquisa, as ferramentas computacionais utilizadas, assim como a descrição dos diferentes cenários analisados.

No capítulo 5 são apresentados os resultados.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do estudo, assim como as sugestões de trabalhos futuros.

Ao final do trabalho, no capítulo 7, são apresentadas as referências bibliográficas.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos importantes para o desenvolvimento e entendimento da pesquisa. Inicialmente será abordada a influência da chuva na estabilidade de taludes naturais, depois serão discutidos conceitos básicos da mecânica dos solos não saturados. Posteriormente serão apresentados os conceitos e características dos solos residuais tropicais, contemplando principalmente os itens atrelados a fluxo e a estabilidade.

### 2.1 INFLUÊNCIA DA CHUVA NA ESTABILIDADE DE TALUDES

Segundo Vargas (1999), os escorregamentos registrados na Serra do Mar estão geralmente associados a um longo período de chuvas intensas e uma das causas que explica a ocorrência dos escorregamentos é a redução ou eliminação da resistência ao cisalhamento do solo devido à redução da parcela de sucção em solos não saturados, geradas pela infiltração de água da chuva no solo.

Segundo Wolle e Carvalho (1989), o principal processo de ruptura em encostas naturais está associado à perda de sucção dos solos mais superficiais e não pela saturação do maciço devido à infiltração da água da chuva.

Apesar da chuva ser apontada como o principal agente deflagrador dos movimentos de massa, diversas outras características do talude podem influenciar na estabilidade global da encosta, como as condições geoestruturais, litológicas, topográficas e hidrogeológicas, entre outras.

Diversos autores, tais como Matos (1974), Lumb (1975), Guidicini e Iwasa (1976), Brand (1985), Vargas Jr. *et al.* (1986), Tatizana *et al.* (1987), Wolle (1988), Carvalho (1989), Ng *et al.* (1998) e Avila *et al.* (2003) apresentam estudos específicos mostrando a influência de alguns parâmetros hidrológicos e geotécnicos nos escorregamentos de massa.

Segundo Farias (2013) a prática corrente na engenharia geotécnica é que as propriedades do solo sejam determinadas baseando-se em ensaios de campo e em

poucos ensaios de laboratório. Parâmetros específicos, como a sucção, são obtidos por estimativas conservadoras baseadas nos poucos resultados obtidos nos ensaios de laboratório.

Atualmente, com o avanço da engenharia e estudos específicos para este tipo de problema, é possível determinar parâmetros particulares do solo, assim como utilizar ferramentas numéricas que auxiliam na compreensão da dinâmica e influência da chuva na estabilidade de taludes naturais.

## 2.2 PROPRIEDADES DOS SOLOS NÃO SATURADOS

### 2.2.1 Introdução

Os estudos envolvendo solos não saturados são de interesse da mecânica dos solos desde a instituição da mesma como uma ciência de engenharia. (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). Esse interesse é explicado pelo grande número de obras de engenharia envolvendo solos não saturados, como aterros, barragens, estabilização de taludes e encostas naturais.

Segundo Lopes (2006), esta condição de não saturação ocorre em uma grande extensão do planeta, pois 60% dos países do mundo encontram-se em regiões de clima árido e semi-árido e em países de clima tropical, como o Brasil, onde ocorrem longos períodos de estiagem, suficientes para causar a dessaturação do solo.

O clima desempenha um papel importante quer o solo esteja na condição saturada ou não saturada. A água é removida do solo por evaporação na superfície do terreno ou pela evapotranspiração da cobertura vegetal. Estes processos acabam produzindo um fluxo ascendente de água para fora do solo. Em contrapartida, a chuva e outras formas de precipitação fornecem um fluxo descendente de água por dentro do solo. O balanço entre estas duas situações de fluxo impõe a condição de poropressão da água num determinado tipo de solo (FREDLUND, 1994).

Variações climáticas influenciam o teor de umidade do solo próximo à superfície do terreno. Quando umedecido, a poropressão de água aumenta, tendendo

a valores positivos. Como resultado, ocorrem mudanças na resistência ao cisalhamento do solo. Alguns solos são conhecidos pela sua significativa capacidade de perder a resistência ao cisalhamento quando umedecidos. Mudanças na poropressão negativa da água associada com períodos de chuvas intensas e prolongadas são as causas de numerosas rupturas de encostas e taludes. Este fenômeno em particular, indica o papel importante que a poropressão negativa da água ou sucção matricial desempenha no controle do comportamento mecânico dos solos não saturados (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

### 2.2.2 Potencial da água no solo

O estado de energia da água pode ser expresso como a soma das duas formas clássicas de energia: cinética, associada à velocidade da água, e potencial, associada a outros componentes.

Admitindo-se que a velocidade da água no solo é em geral muito baixa, considera-se a energia cinética nula. Portanto, a energia potencial representa o estado de energia da água, também chamado de potencial total da água no solo.

O potencial total da água no solo ( $\psi$ ), ou potencial hidráulico, pode ser dividido em cinco componentes (REICHARDT e TIMM, 2004): térmico ( $\psi_t$ ), de pressão ( $\psi_p$ ), gravitacional ( $\psi_g$ ), osmótico ( $\psi_o$ ) e matricial ( $\psi_m$ ):

$$\psi = \psi_t + \psi_p + \psi_g + \psi_o + \psi_m \quad (1)$$

O potencial **gravitacional** é desprezível da mesma forma como o potencial **térmico**, pois em condições normais a água presente no solo apresenta pequenas variações de temperatura.

A componente **de pressão** também é desconsiderada, apenas será considerada quando a pressão atuante sobre a água for maior que a pressão atmosférica, sendo nesse caso considerada positiva.

Portanto a Equação (1) pode ser reescrita como sendo:

$$\psi = \psi_p + \psi_o + \psi_m \quad (2)$$

Considerando os termos da Equação (2) como pressões equivalentes, é possível separar a equação em dois termos, sendo um equivalente à poropressão positiva ( $\psi_p$ ), apresentada na Equação (3), e outro termo equivalente à poropressão negativa ou sucção total, que é constituída pelas parcelas osmótica e matricial, expressa pela Equação (4):

$$\psi_p = u_w = \gamma_w \cdot Z_w \quad (3)$$

$$\psi_T = \psi_o + \psi_m \quad (4)$$

Onde:

$\gamma_w$  = peso específico da água;

$Z_w$  = distância entre o ponto a ser medido e o nível da água.

Portanto a sucção total do solo é composta por duas parcelas: a sucção osmótica e a sucção matricial.

A sucção **osmótica** é função da concentração de solutos dissolvidos na água intersticial, geralmente originados por processos externos como lixiviação de solos ou pela presença de solutos absorvidos na superfície dos minerais do solo. Normalmente, a variação na concentração de solutos na água é pequena, sendo esta componente desprezível, em relação às outras.

A sucção **mátrica** está relacionada ao fenômeno de capilaridade presente acima do nível do lençol freático, resultado da tensão superficial do líquido em contato com a parede dos poros, e à presença de água absorvida no solo (LU e LIKOS, 2004).

Com o intuito de facilitar o entendimento e facilitar a leitura, neste trabalho, o termo sucção refere-se sempre a sucção matricial salvo quando indicado no texto.

O entendimento da relação entre a sucção e a umidade são de extrema importância nas análises de fluxo em meios não saturados. A variação da sucção, associada às características de retenção do solo, pode deflagrar um evento de

instabilização, processo decorrente da diminuição da resistência ao cisalhamento do solo.

### 2.2.3 Medição e determinação da sucção

Segundo Jesus (2008), a curva de retenção pode ser obtida de forma direta através de ensaios de laboratório ou de campo que relacionem o teor de umidade ou grau de saturação com o potencial total, matricial ou osmótico do solo.

A sucção pode ser determinada em laboratório através do uso de placas ou membranas de pressão, também pode-se determinar através da aplicação direta de sucção utilizando-se funil de pedra porosa ou através de tensiômetros convencionais e de alta capacidade.

Indiretamente pode-se determinar através de relações entre o potencial com a permeabilidade elétrica (psicrômetros), a permeabilidade térmica (sensores de permeabilidade térmica), ou através de elementos porosos (papel filtro), utilizando-se sempre curvas de calibração.

A Tabela 1, extraída de Vilar (1987), indica alguns métodos experimentais para a determinação ou controle da sucção assim como o intervalo de aplicação. Para o desenvolvimento desta dissertação a sucção foi determinada pelo método indireto do papel filtro.

Tabela 1 – Métodos experimentais para a determinação ou controle da sucção. Fonte: Vilar (1987).

<b>Funil de pedra porosa</b> (matricial)	0 a 70 kPa (Horas)	- sucção é aplicada diretamente à amostra; - bom para baixas sucções onde a precisão das panelas é limitada.	
<b>Placa de Pressão</b> (matricial)	0 a 1.500 kPa (Horas)	- emprega a técnica de translação de eixos; - depende da capacidade da pedra porosa (pressão de entrada de ar); - continuidade da fase ar	
<b>Membrana de pressão</b> (matricial/total?)	Até 10.000 (dias)	- emprega a técnica de translação de eixos; - emprega membrana de celulose (seletividade?)	
<b>Tensiômetro</b> (matricial)	0 a 70 kPa (minutos)	- tempo de resposta: depende da condutância da pedra porosa; sensibilidade do elemento de medida; - existem tensiômetros baseados em princípios osmóticos; - tensiômetros de alta capacidade (para pressões de -1 atm); tiram partido da elevada resistência à tração da água	
<b>Papel Filtro</b>	Papel-solo em contato (matricial)	30 a 30.000 kPa (7 dias)	- depende do contato entre o solo (pode ser dificuldade); - necessita calibração do papel filtro;
	Papel-solo sem contato (total)	400 a 30.000 kPa (7 a 14 dias)	- evitar formação de fungos; - pesagem (precisão 0,0001g)
<b>Blocos Porosos</b> (matricial)	10 a 1.000 kPa (semanas)	- baseia-se na condutividade elétrica de materiais porosos (gesso, fibra de vidro, etc); resistência elétrica (ohms x sucção); - desvantagens: solubilidade do gesso, histerese pronunciada, mais sensível a altas sucções.	
<b>Psicrômetros</b> (total / osmótica)	100 a 8.000 kPa (minutos)	- depende de rigoroso controle da temperatura, principalmente nas baixas sucções; mais recomendado para laboratório; - sucção osmótica; mede sucção de extrato da solução do solo (confiabilidade precária).	
<b>Sensores de Condutividade Térmica</b> (osmótica)	todos os valores (minutos)	- condutividade elétrica do extrato da solução; - concentração de solutos; - extrato + psicrômetros: resultados precários.	
<b>Equilíbrio da fase vapor</b> (total)	Toda a faixa acima de $\approx$ 400 kPa (dias)	- solução com concentração conhecida, umidade relativa, sucção total; - amostra de solo em dessecador sem contato com a solução até equilíbrio de peso; - equilíbrio demorado.	
<b>Princípios Osmóticos</b> (matricial)	200 a 1.600 kPa (horas)	- solo em contato com solução com concentração conhecida (umidade relativa conhecida) através de membrana seletiva; - solução de PoliEtilenoGlicol (PEG), peso molecular 20.000; - útil para instalar e controlar sucção em ensaios	

## 2.2.4 Curva retenção

Segundo Lu e Likos (2004), os mecanismos físicos e físico-químicos responsáveis pela sucção do solo durante um processo de umedecimento e secagem são variáveis, apresentando altos valores de sucção para baixos teores de umidade e baixos valores de sucção para altos teores de umidade, sendo esta variação comum aos diferentes tipos de solo e seu entendimento é fundamental quando do estudo de solos não saturados.

De acordo com Fredlund e Xing (1994), esta variação se deve à relação existente entre o teor de umidade e sucção nos solos, e sua distribuição é conhecida como curva de retenção ou curva característica. O teor de umidade define a quantidade de água contida no interior dos poros dos solos, podendo ser expressa em índices de volume ( $\theta_s$ ).

A curva de retenção (Figura 2), é uma relação constitutiva de grande importância na mecânica dos solos não saturados. Segundo Rocha (2011), a curva característica do solo aparece como uma ferramenta conceitual e de interpretação, através da qual o comportamento dos solos não saturados pode ser avaliado conforme as mudanças na sucção.

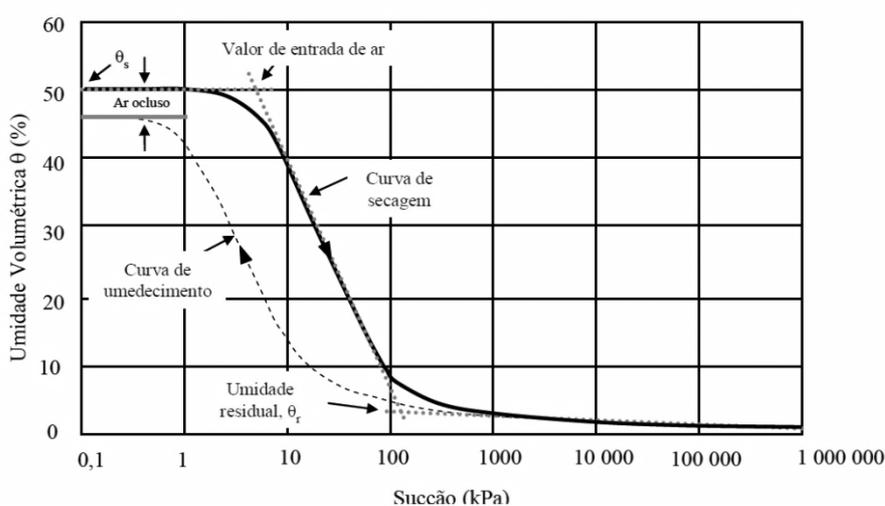


Figura 2 – Curva de retenção típica para um solo siltoso. Fonte: adaptada de Fredlund e Xing (1994).

A Figura 2 representa a curva de retenção de um solo siltoso e algumas características que merecem destaque. O valor da umidade residual ( $\theta_r$ ) é um valor de umidade associado a altos valores de sucção, ou seja, quando a água retida pelo solo encontra-se na forma de filmes finos ou meniscos desconectados (LU e LIKOS, 2004). A umidade de saturação ( $\theta_s$ ), que neste caso é igual à porosidade do solo, devido à saturação total da etapa.

O comportamento da curva de retenção depende do tipo de solo analisado, pois é influenciada pelas propriedades do material, como: distribuição do tamanho dos poros, distribuição granulométrica, densidade, teor de matéria orgânica, teor de argila e mineralogia (LU e LIKOS, 2004).

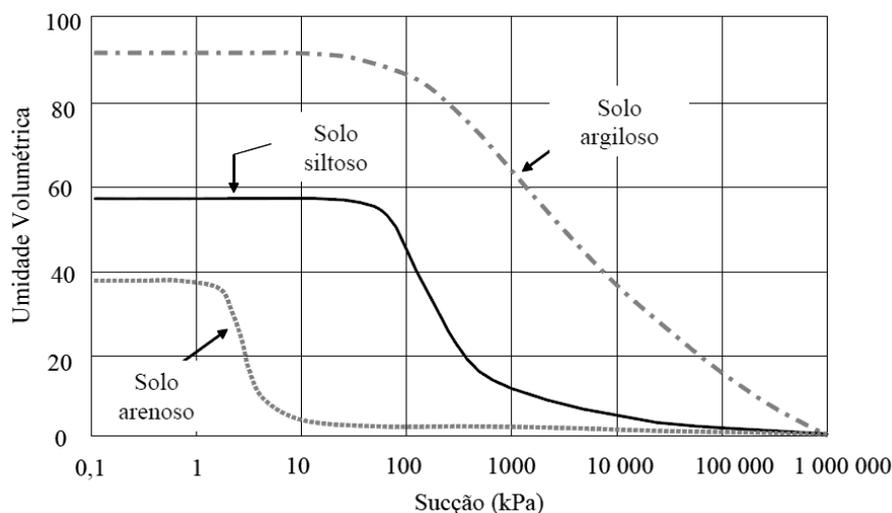


Figura 3 – Curvas de retenção típicas para diferentes solos. Fonte: adaptado de Fredlund e Xing (1994).

Na Figura 3, são apresentadas curvas de retenção para diferentes tipos de solos, onde é possível observar que para baixos valores de sucção, a quantidade de água retida no solo depende, principalmente, dos efeitos de capilaridade, que estão diretamente ligados com a distribuição granulométrica e estrutura do solo. Para altos valores de sucção, a quantidade de água retida no solo dependerá dos mecanismos de absorção, influenciados pela composição mineralógica e pela superfície específica das partículas (FREDLUND e XING, 1994).

Observa-se também que os solos arenosos dessaturam mais rapidamente após o valor da entrada de ar, devido à pequena variação no diâmetro dos poros, ou

seja, a água drena mais rapidamente atingindo a umidade volumétrica residual. Os solos argilosos dessaturam de forma mais lenta, apresentando uma inclinação da curva mais suave e uma distribuição nos vazios dos solos não-uniforme.

Segundo Cardoso Jr. (2006), os solos tropicais não apresentam necessariamente o mesmo comportamento das curvas apresentadas na Figura 3. Devido à estrutura e a distribuição dos poros nos solos tropicais, as curvas de retenção podem apresentar patamares, causados pela ausência de poros que definem a faixa de sucção para esta faixa.

Feuerharmel *et al.* (2004) apresentaram a curva de retenção para um solo coluvionar. A curva apresenta comportamento intermediário entre um solo arenoso e um solo argiloso, conforme mostra a Figura 4, abaixo. O formato da curva foi definido pelos autores como sendo semelhante a uma “sela”, apresentando um comportamento bimodal.

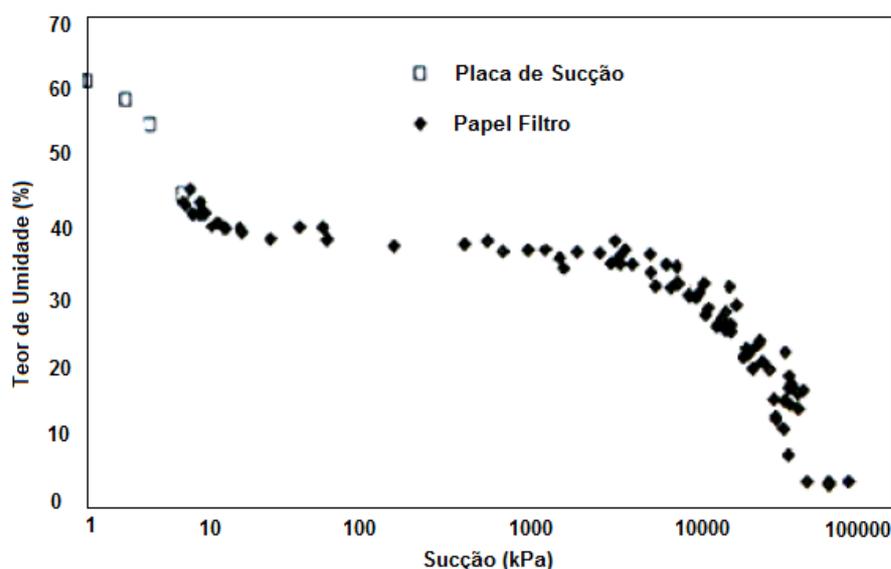


Figura 4 – Curva de retenção para solos tropicais. Fonte: Feuerharmel *et al.* (2004).

Outro fator que influencia na determinação da curva de retenção é o histórico de variação do teor de umidade, ou seja, os ciclos de umedecimento e secagem. Este fenômeno é conhecido como histerese e pode ser verificado na Figura 5, como sendo a diferença entre as curvas de umedecimento e secagem.

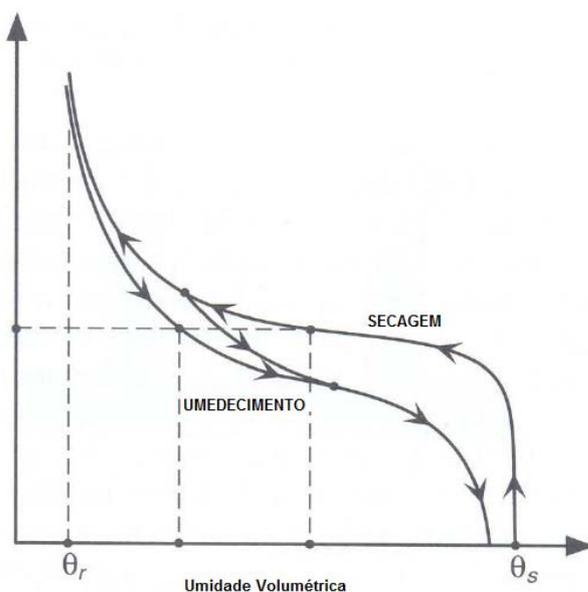


Figura 5 – Histerese. Fonte: Miqueletto (2007).

Segundo Röhms (1992) o efeito de histerese pode ser atribuído à não uniformidade dos poros, aos ângulos de contato entre partículas, a presença de bolhas de ar que permanecem no solo durante o processo de umedecimento e as possíveis mudanças estruturais.

Diversos autores desenvolveram modelos matemáticos para simular a curva de retenção do solo, baseados em funções empíricas que relacionam o teor de umidade com a sucção, na distribuição dos poros ou na distribuição granulométrica dos materiais. Na Tabela 2 é apresentada um resumo dos modelos propostos.

Tabela 2 – Métodos de curva de retenção propostos. Fonte: Peixoto (2011).

Modelo	Equação	Parâmetros de Ajuste
Gardner (1958)	$\Theta = \frac{1}{1 + (q \cdot \psi)^n}$	$q$ – relacionado à pressão de entrada de ar; $n$ – relacionado à inclinação do ponto de inflexão da curva.
Brooks & Corey (1964)	$\Theta = \left( \frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda$	$\psi_b$ – pressão de entrada de ar; $\lambda$ – índice de distribuição de poros.
Williams et al. (1983)	$\ln \Theta = a_1 + b_1 \ln \psi$	$a_1$ e $b_1$ – constantes que interferem na forma da curva.
McKee & Bumb (1984)	$\Theta = A e^{(\alpha \psi - B)}$	$A$ , $B$ e $\alpha$ – constantes que interferem na forma da curva.
McKee & Bumb (1987)	$\Theta = \frac{1}{1 + A e^{(\alpha \psi - B)}}$	$A$ , $B$ e $\alpha$ – constantes que interferem na forma da curva.
van Genuchten (1980)	$\Theta = \left[ \frac{1}{1 + (p \cdot \psi)^n} \right]^m$	$p$ , $m$ e $n$ – constantes úteis na determinação de parâmetros do solo.
Fredlund & Xing (1994)	$\Theta = \left\{ \frac{1}{\ln \left[ e + (\psi / a)^n \right]} \right\}^m$	$a$ , $m$ , e $n$ – constantes que interferem na forma da curva.

Nota:  $\Theta$  é a umidade volumétrica normalizada e é dada por:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

No presente trabalho a curva de retenção será ajustada pelo modelo matemático proposto por Fredlund e Xing (1994), com o auxílio do *software* Seep/W (GEO-SLOPE, 2007).

### 2.2.5 Coeficiente de permeabilidade de solos não saturados

Segundo Calle (2000), o coeficiente de permeabilidade do material e a curva de retenção determinam as propriedades hidráulicas do solo, ou seja, definem o comportamento do fluxo da água em seus vazios.

O coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) ou condutividade hidráulica representa uma propriedade do meio em transportar água, sendo fundamental no entendimento do fluxo em meios porosos. Quanto maior a condutividade hidráulica do solo mais facilmente a água permeia por este solo.

Para os solos saturados a condutividade hidráulica é constante, pois o teor de umidade não varia. Para os solos não saturados, o coeficiente de condutividade hidráulica é função tanto do índice de vazios quanto do teor de umidade do solo.

A permeabilidade não saturada pode ser determinada diretamente por meio de métodos experimentais *in situ* ou laboratoriais ou indiretamente através de modelos matemáticos preditivos.

A maioria dos métodos experimentais para a determinação da condutividade hidráulica não saturada é similar aos métodos aplicados para a determinação da condutividade hidráulica saturada, ou seja, baseados na lei de Darcy. Porém o tempo necessário para a determinação da condutividade hidráulica em laboratório (método direto) é muito grande, pois o processo de determinação torna-se mais demorado à medida que o teor de umidade aumenta.

Em função das dificuldades experimentais na determinação da condutividade hidráulica, vários pesquisadores utilizam modelos baseados na curva de retenção e na permeabilidade saturada do solo, os quais são de mais fácil determinação experimental (VAN GENUCHTEN, 1980). A Figura 6 mostra uma curva de retenção de água típica para um solo arenoso e sua respectiva curva de condutividade hidráulica determinada através de métodos indiretos.

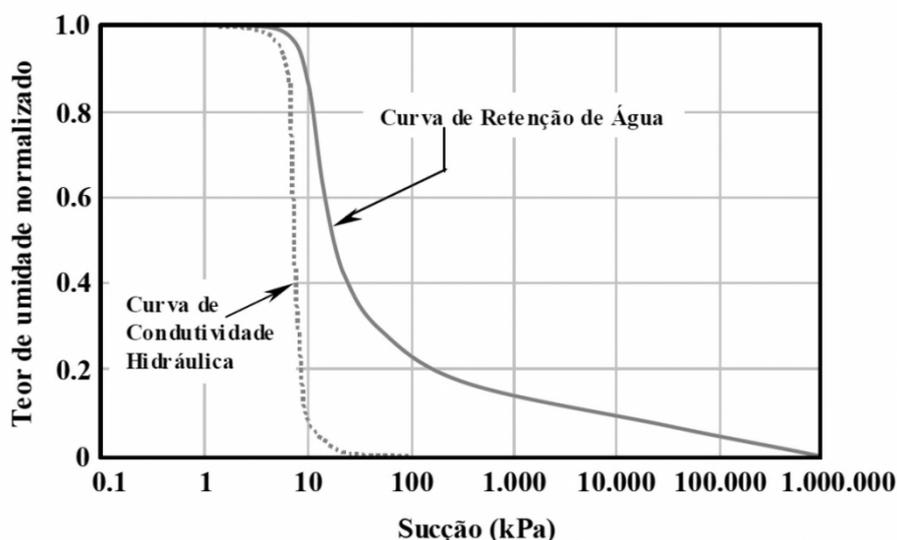


Figura 6 – Curvas de retenção de água e condutividade hidráulica para um solo arenoso. Fonte: Fredlund (1994).

Segundo Leong e Rahardjo (1997), as funções de condutividade hidráulica podem ser separadas em três distintos grupos: empíricas, macroscópicas e modelos estatísticos. A Tabela 3 sintetiza os principais modelos utilizados na determinação da condutividade hidráulica do solo.

**Tabela 3 – Síntese dos modelos de funções de condutividade hidráulica. Fonte: Peixoto (2011).**

Tipo	Modelo	Equação	Parâmetros de Ajuste
$k(\theta)$	Avermajov (1950)	$k_r = \Theta^n$	$n$ – constante de ajuste.
	Campbell (1973)	$k = k_s \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^n$	$n$ – constante de ajuste.
	Davidson et al. (1969)	$k = k_s \cdot e^{[\alpha(\theta - \theta_s)]}$	$\alpha$ – constante de ajuste.
	Van Genuchten (1980)	$k = k_s \cdot \Theta^{1/2} \cdot [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2$	$m$ – constante de ajuste.
$k(\psi)$	Brooks & Corey (1964)	$k = k_s$ , para $\psi < \psi_b$ $k = k_s (\psi / \psi_b)^{-n}$ , para $\psi \geq \psi_b$	$\psi_b$ – pressão de entrada de ar;
	Gardner (1958)	$k = k_s \cdot e^{(-\alpha\psi)}$	$\alpha$ – constante de ajuste;
	Richards (1931)	$k = a \cdot \psi + b$	$a$ e $b$ – constantes de ajuste;
	Ritjema (1965)	$k = k_s$ , para $\psi \leq \psi_b$ $k = k_s \cdot e^{[-\alpha(\psi - \psi_b)]}$ , para $\psi_b \leq \psi \leq \psi_1$ $k = k_1 \cdot (\psi / \psi_1)^{-n}$ , para $\psi > \psi_1$	$\alpha$ e $n$ – constantes de ajuste; $\psi_1$ – sucção residual; $k_1 - k$ para $\psi = \psi_1$ .
	Wind (1955)	$k = \alpha \psi^{-n}$	$\alpha$ e $n$ – constantes de ajuste;
	Leong & Rahardjo (1997b)	$k_r = \frac{1}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{A} \right)^B \right] \right\}^C}$	$A$ , $B$ e $C$ – constantes de ajuste;

Nota:  $k_r$  é o coeficiente de condutividade hidráulica relativa:

$$k_r = k / k_s$$

Para o desenvolvimento da pesquisa, utilizou-se a modelo desenvolvido por Van Genuchten, cuja formulação empírica é a mais utilizada em problemas práticos de engenharia.

## 2.2.6 Métodos para análise de estabilidade de taludes

Segundo Tonus (2009), as análises de estabilidade são divididas em dois grandes grupos: o método dos deslocamentos (análise de tensões) e o método do equilíbrio limite.

O método do equilíbrio limite (método das fatias) se baseia na hipótese de haver equilíbrio em uma massa de solo, tomada como corpo rígido, na eminência de entrar em processo de escorregamento. Consiste basicamente em discretizar essa massa de solo em fatias verticais e assim avaliar o seu equilíbrio, considerando forças e momentos atuantes e resistentes.

Este método foi difundido no início do século 20, e hoje representa a técnica de análise de estabilidade de taludes mais utilizada, devido à sua facilidade de aplicação e a experiência acumulada ao longo dos anos.

Os procedimentos de análise de estabilidade se caracterizam pela definição de um fator de segurança, valores estes obtido pela relação entre a resistência ao cisalhamento do solo ( $\tau$ ) e a tensão cisalhante atuante ou resistência mobilizada ( $\tau_{mob}$ ) ao longo da superfície de ruptura, conforme a Equação (5) abaixo.

$$FS = \tau / \tau_{mob} \quad (5)$$

Onde:

$\tau$  = resistência ao cisalhamento do solo

$\tau_{mob}$  = tensão cisalhante atuante ou resistência mobilizada

Em 1916, surge a primeira proposta para análise de estabilidade utilizando o método das fatias. Nas décadas seguintes, Fellenius (1936) introduziu o método ordinário conhecido com método das fatias. Nos anos 50, Jambu (1954) e Bishop (1955) contribuíram com o avanço do método, finalmente nos anos 60 surgiram os métodos mais rigorosos, desenvolvidos por Morgenstern e Price (1965) e por Spencer (1967) (GEO-SLOPE, 2007).

Na Tabela 4 são apresentadas as características principais de cada método citado.

**Tabela 4 – Características dos métodos de equilíbrio limite. Fonte: Geo-Slope (2007).**

<b>MÉTODO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Fellenius (1927)	Superfície de ruptura circular Satisfaz o equilíbrio de momentos
Bishop Simplificado (1955)	Superfície de ruptura circular Satisfaz o equilíbrio de momentos Satisfaz o equilíbrio de forças verticais
Janbu Simplificado (1968)	Superfície de ruptura qualquer Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais
Morgenstern e Price (1965)	Superfície de ruptura qualquer Satisfaz o equilíbrio de momentos Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais
Spencer (1967)	Superfície de ruptura qualquer Satisfaz o equilíbrio de momentos Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais

### 2.2.7 Resistência ao cisalhamento dos solos não saturados

Para o cálculo do fator de segurança de uma encosta natural, diversos parâmetros do solo são necessários, sendo a resistência ao cisalhamento a propriedade de maior importância, conforme mostrado na Equação (5) acima.

Em 1925 Terzaghi identificou qual é a influência da água na resistência ao cisalhamento do solo, mostrando que o critério de Mohr-Coulomb (Equação 6), continua válido desde que a pressão da água contida nos poros do solo (poropressão) fosse subtraída da tensão normal. Este conceito definiu o que conhecemos hoje, como o princípio das tensões efetivas (Equação 7):

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (6)$$

Onde:

$\tau$  = resistência ao cisalhamento do solo

$\sigma$  = tensão total normal

$c$  = intercepto coesivo

$\phi$  = ângulo de atrito do solo

$$\tau = c' + (\sigma - u) \cdot \tan \phi \quad (7)$$

O princípio das tensões efetivas desenvolvido por Terzaghi, apresentado acima, é válido apenas para solos saturados, devido à não consideração da parcela referente à sucção mátrica do material.

Para os solos não saturados este princípio não é válido integralmente, o que torna o entendimento do comportamento mecânico dos solos um pouco mais complexo (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Segundo Lu e Likos (2004), o estado de tensões para o solo não saturado é diferente dos solos saturados ou secos. Em solos saturados a pressão de água é positiva e atua diminuindo a tensão atuante entre as partículas, levando a uma redução da resistência ao cisalhamento do material. Para os solos não saturados a pressão de água é negativa, provocando a aproximação entre os grãos de solo e conseqüentemente ao aumento da resistência ao cisalhamento.

Bishop em 1959 propôs a primeira equação sobre a resistência ao cisalhamento de solos não saturados, Equação (8). A teoria considera o princípio das tensões efetivas proposta por Terzaghi e o critério de ruptura proposto por Mohr-Coulomb:

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi * (u_a - u_w)] * \tan \phi' \quad (8)$$

Onde:

$\tau$  = resistência ao cisalhamento dos solos não saturados

$c'$  = coesão efetiva

$(\sigma - u_a)$  = tensão normal líquida

$\chi$  = parâmetro dependente do grau de saturação

$(u_a - u_w)$  = sucção matricial

$\phi'$  = ângulo de atrito efetivo

Fredlund e Morgenstern (1977) propuseram uma outra equação para a determinação da resistência ao cisalhamento dos solos não saturados.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (9)$$

Onde  $\phi^b$  quantifica o acréscimo de resistência com o aumento da sucção.

Graficamente a Equação (9) que representa a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado, proposta por Fredlund, é apresentada na Figura 7, abaixo.

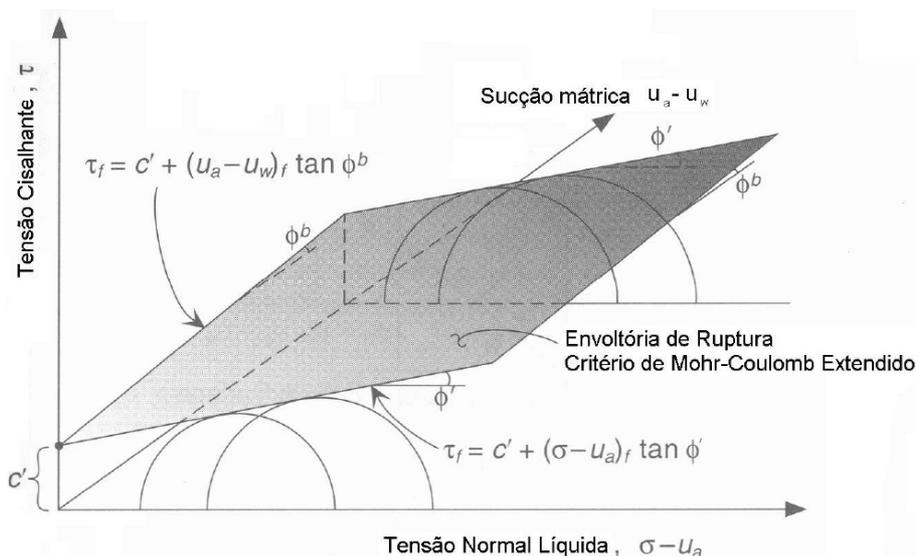


Figura 7 – Superfície de ruptura influenciada pela sucção. Fonte: Adaptado de Lu e Likos (1994) *apud* Miqueletto (2007)).

Sendo  $\phi^b$  e  $\chi$  variáveis dependentes do grau de saturação do solo, o qual apresenta comportamento não linear após o ponto de pressão de entrada de ar.

Comparando as equações 8 e 9 observa-se uma equivalência se relacionarmos  $\tan \phi^b = \chi \cdot \tan \phi'$ . Segundo Campo (1997) *apud* Miqueletto (2007) e Rocha (2011) observa-se que a obtenção do parâmetro  $\phi^b$  é mais facilmente determinado quando comparado ao parâmetro  $\chi$ , o que torna a equação 9, desenvolvida por Fredlund e Morgenstern a mais utilizada.

## 2.3 ENCOSTAS NATURAIS

Encostas naturais são tipos de relevo decorrentes do processo de intemperismo e deposição diferencial de materiais, que ocorreram durante vários períodos geológicos.

Segundo Farias (2013), a formação do perfil de intemperismo envolve processos físicos, químicos e biológicos. Em regiões tropicais o processo de intemperismo é potencializado devido à grande variação de topografia, clima e vegetação. Logo, os solos tropicais apresentam uma grande variabilidade mineralógica e os perfis de intemperismo são mais profundos.

Townsend (1985) apresentou esquematicamente a variação da espessura do manto de intemperismo em áreas tectonicamente inativas, associando precipitação, temperatura e evaporação, assim como a vegetação com a profundidade do perfil, conforme apresenta a Figura 8 abaixo.

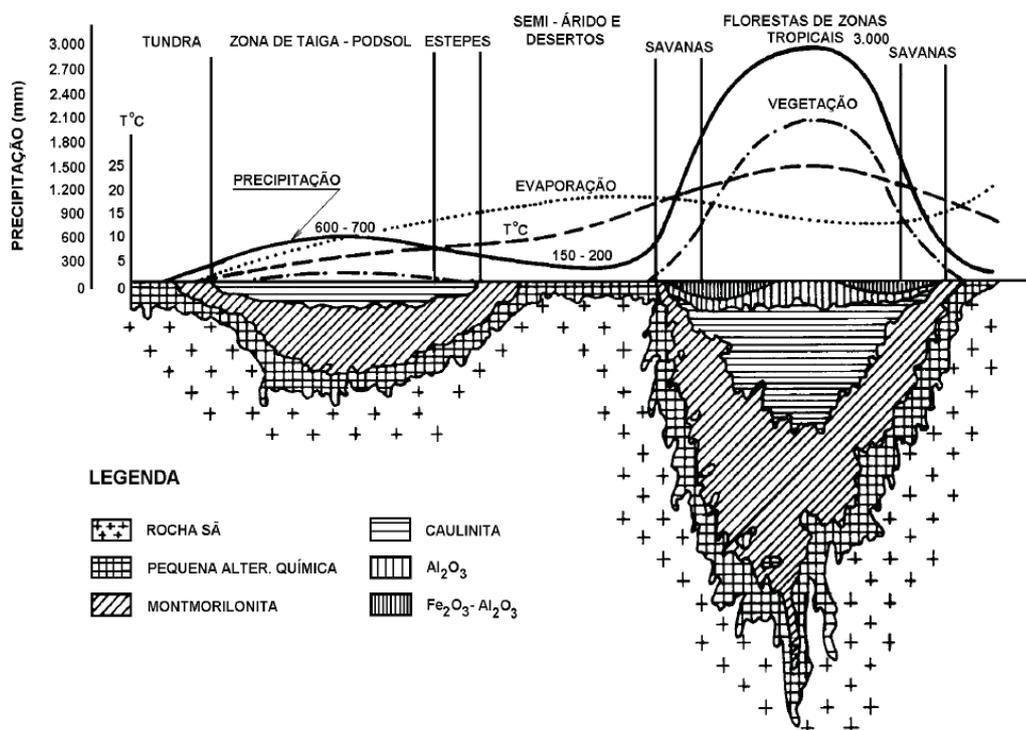


Figura 8 – Esquema de mantos de intemperismo. Fonte: Townsend (1985) *apud* Suzuki (2004)).

Diante do processo de intemperismo, dois tipos de solos podem ser formados: os solos residuais e os solos coluvionares (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

Os solos residuais são definidos como “material terroso proveniente do processo de intemperização e deposição da rocha *in situ* e que não tenha sido transportado da sua posição original” (BLIGHT, 1997).

Segundo Marchesini (2007), os solos residuais são subdivididos em residuais maduros, relativamente homogêneos e não apresentam mais a estrutura da rocha mãe; solos saprolíticos que possuem veios intrusivos e juntas preenchidas; solos residuais jovens os quais apresentam características visuais de rocha porém desagregam facilmente; e os blocos de rocha de material inalterado.

Solos coluvionares são solos transportados por gravidade e depositados no sopé de taludes naturais ou encostas rochosas. São compostos por blocos e/ou grãos de qualquer dimensão, apresentando grande variabilidade de textura e com rede de fluxo bem estabelecida nos períodos de chuvas (LACERDA e SANDRONI, 1985, *apud* SILVEIRA, 2003).

### 2.3.1 Deslizamentos de massa

Os deslizamentos de massa são comumente classificados pelas características do movimento, como geometria da encosta e tipo do material envolvido, podendo ocorrer a movimentação de blocos de rocha, solos e aterros artificiais.

As movimentações podem ser classificadas como: queda ou desprendimento, tombamento, escorregamento, espalhamento, rastejo e por corridas (USGS, 2009, *apud* ROCHA, 2011). Abaixo segue breve descrição dos processos.

#### Queda ou Desprendimento

As quedas, ou desprendimentos (Figura 9), são movimentos bruscos de massas de materiais geológicos, tais como pedras e pedregulhos, que se desprendem de encostas íngremes ou falésias. Segundo Rocha (2011), a movimentação gera pouco ou nenhum esforço de cisalhamento.

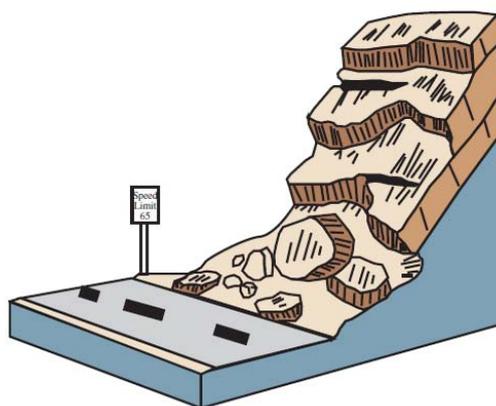


Figura 9 – Queda ou desprendimento. Fonte: adaptado de USGS (2009).

### Tombamento

O tombamento é caracterizado pela movimentação da massa de solo devido à ação da gravidade. A movimentação ocorre por rotação em torno de um ponto de falha. (Figura 10).

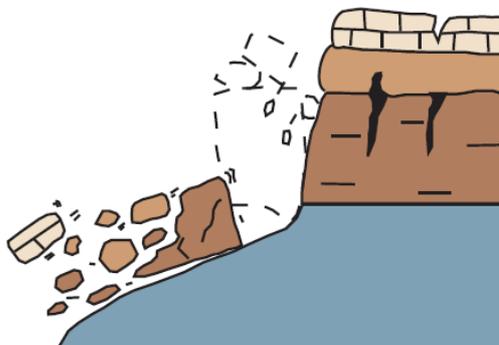


Figura 10 – Tombamento. Fonte: adaptado de USGS (2009).

## Escorregamento

O termo escorregamento refere-se aos movimentos de massa finitos ao longo de uma superfície de ruptura bem definida. Podem ser subdivididos em dois tipos, sendo: rotacionais e translacionais. (Figura 11).

Os escorregamentos rotacionais são caracterizados por superfícies de ruptura circulares, cuja concavidade fica voltada para cima. O sentido do movimento acontece sobre um eixo paralelo à superfície e transversal ao escorregamento.

Os escorregamentos translacionais são movimentos de massa comuns em encostas com perfis retilíneos, a superfície de ruptura é plana e apresenta pequena rotação. Segundo Wolle (1988) os escorregamentos translacionais são comuns no sudeste brasileiro, principalmente na região da Serra do Mar, objeto deste estudo.

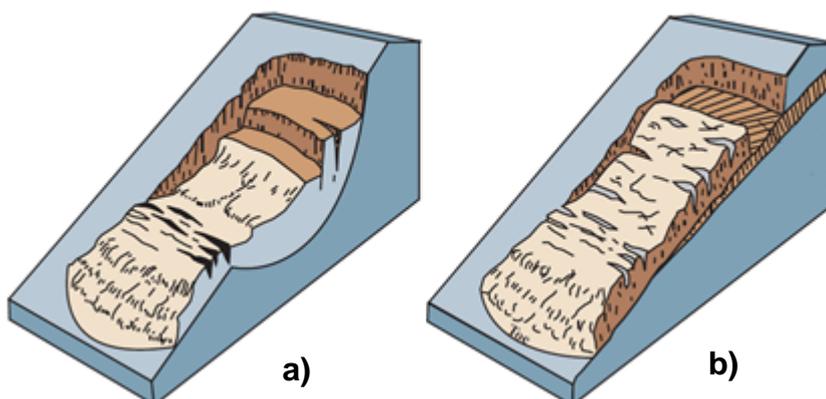


Figura 11 – Escorregamento: (a) rotacional; (b) translacional. Fonte: adaptado de USGS (2009).

## Espalhamento

Segundo Rocha (2011) o espalhamento ocorre em encosta pouco inclinadas ou terrenos planos, onde o sentido principal do movimento acontece lateralmente, acompanhado por fraturas de cisalhamento ou de tração. O movimento é causado por liquefação, onde os solos não coesivos, fofos e saturados passam do estado sólido para o estado líquido. (Figura 12).

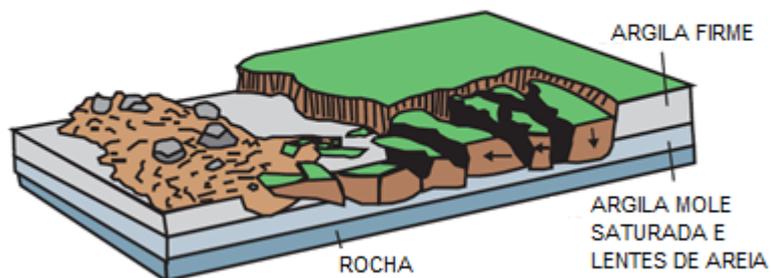


Figura 12 – Espalhamento. Fonte: adaptado de USGS (2009).

### Rastejo (Creep)

Rastejo, ou *creep*, é um movimento lento e contínuo de solo ou rocha, na maioria das vezes pouco perceptível. Segundo Rocha (2011), o movimento é causado por um acréscimo de tensão de cisalhamento capaz de produzir deformações permanentes, porém não suficiente para produzir falhas (Figura 13).

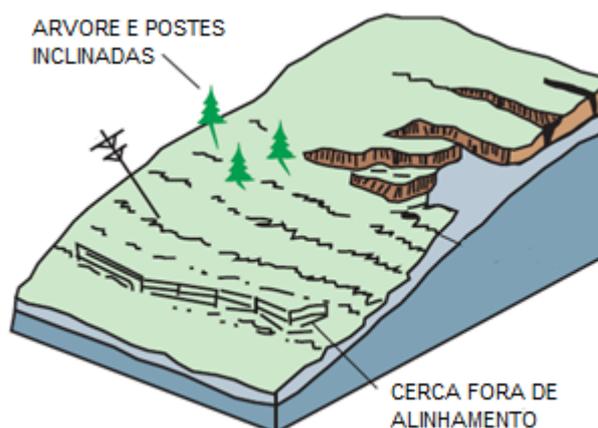


Figura 13 – Rastejo (*Creep*). Fonte: adaptado de USGS (2009).

### Corridas

Apresentam maiores velocidades de movimentações quando comparadas com o fenômeno de rastejo. Diversos são os motivos os quais desencadeiam as

corridas, como o grau de saturação do solo/detritos e vibrações aplicadas no terreno. Elas podem ser subdivididas em corridas de detritos e corridas de terra (Figura 14).

Segundo Rocha (2011), a corrida de detrito é um movimento rápido onde uma massa composta por solo, rocha, matéria orgânica, ar e a água se mobilizam em forma de lama pelas encostas, causadas pelo intenso fluxo de água superficial provocado pelas fortes chuvas. Já as corridas de terra são provocadas pela liquefação do solo devido a chuvas de alta intensidade.

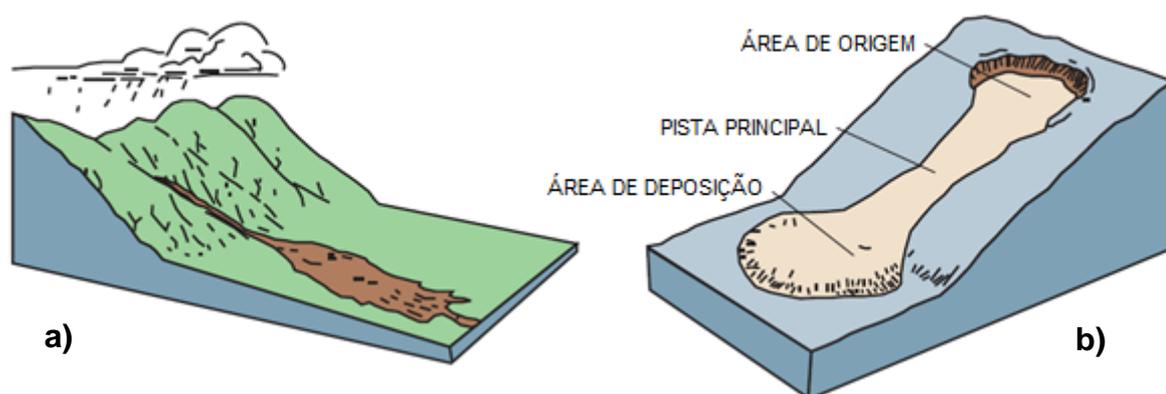


Figura 14 – Corridas: (a) de detritos; (b) de terra. Fonte: adaptado de USGS (2009).

## CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 3.1 LOCALIZAÇÃO E EVIDÊNCIAS

A área de estudo localiza-se próximo as margens da rodovia BR-277, região pertencente à cadeia de montanhas da Serra do Mar, no município de Morretes, estado do Paraná, conforme mostra o mapa de localização (Figura 15).

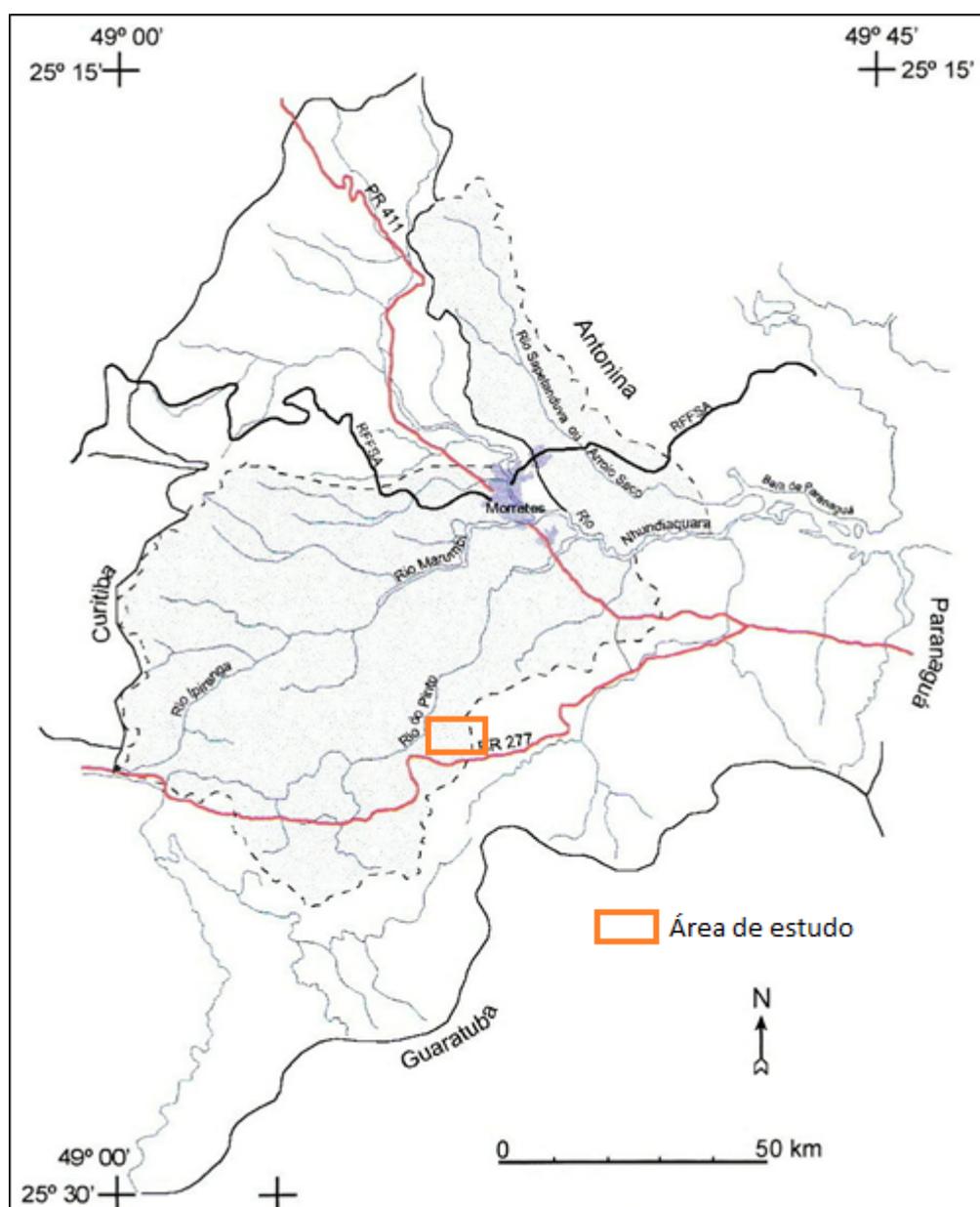
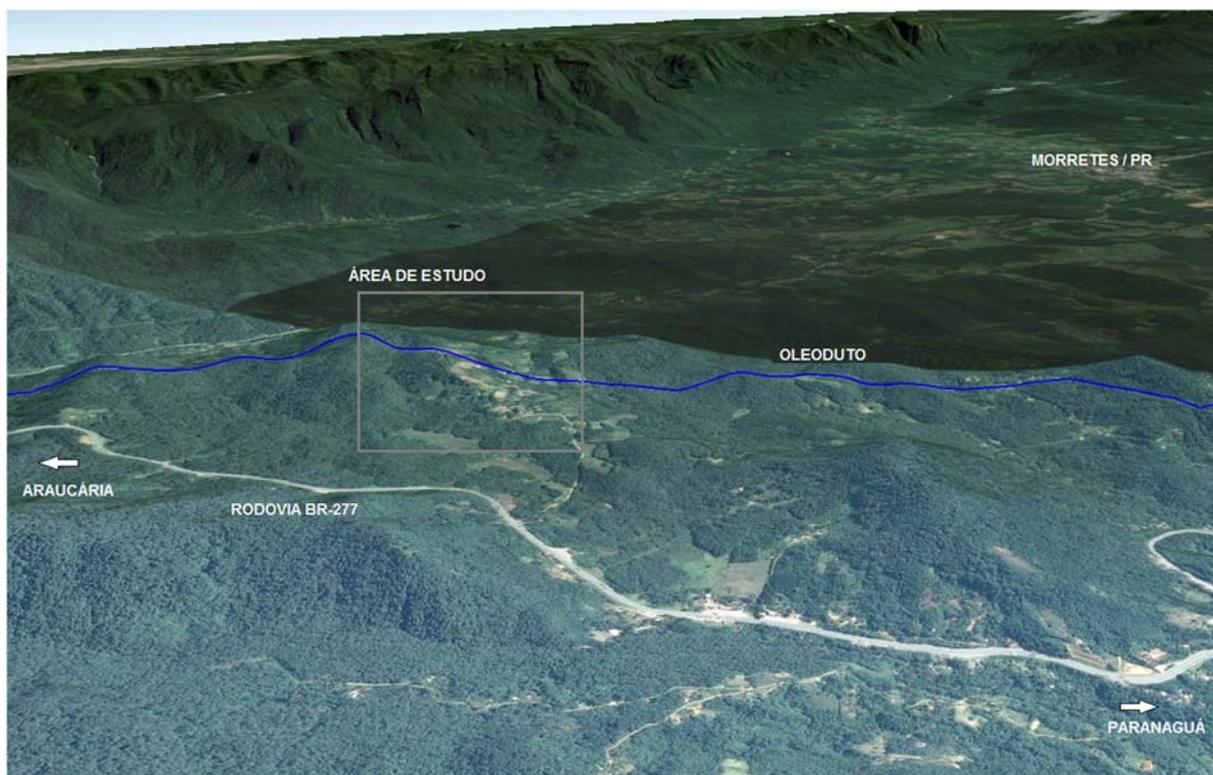


Figura 15 – Localização. Fonte: adaptado de Nunes (2002).

A encosta apresenta altura aproximada de 150 m e comprimento estimado de 650 m. As inclinações dos taludes variam entre 1,8% (região do topo e da base) e 20% região da meso-encosta.

Na área grandes obras de infraestrutura estão implantadas, como importante dutovias e rodovia federal, as quais garantem maior importância social, econômica e ambiental a região, conforme mostrado na Figura 16, abaixo.



**Figura 16 – Região de estudo – Morretes/PR.**

Conforme mostram os dados históricos pluviométricos, a região é atingida por volumosas e intensas chuvas, geralmente acumuladas nos meses de verão. Por ser um trecho pertencente à cadeia de montanha da Serra do Mar, com problemas geotécnicos específicos, a região é suscetível a vários eventos relacionados à estabilidade de encostas.

Na Figura 17 está representado o mapa de cicatrizes de escorregamentos do município de Morretes, litoral do estado do Paraná. Segundo Nunes (2002) há uma maior concentração de cicatrizes ao longo da rodovia BR-277, devido à alteração da geometria das encostas para sua implantação. Outro ponto de atenção levantado foi

o da localização do duto enterrado, o qual atravessa uma área de ocorrência de cicatrizes de escorregamento, assim como altos índices pluviométricos, o que contribui para os eventos de instabilização.

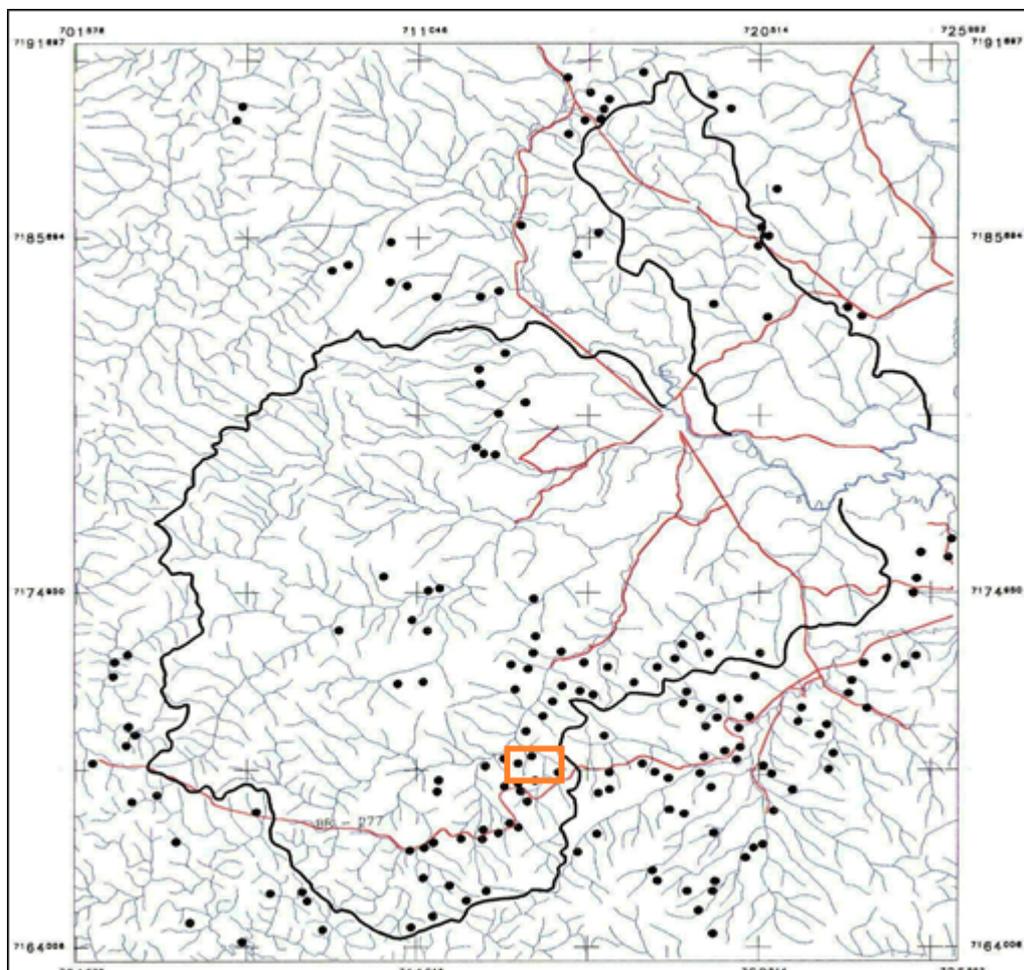


Figura 17 – Mapa de cicatrizes de escorregamentos. Fonte: adaptado de Nunes (2002).

### 3.1.1 Aspectos geológicos

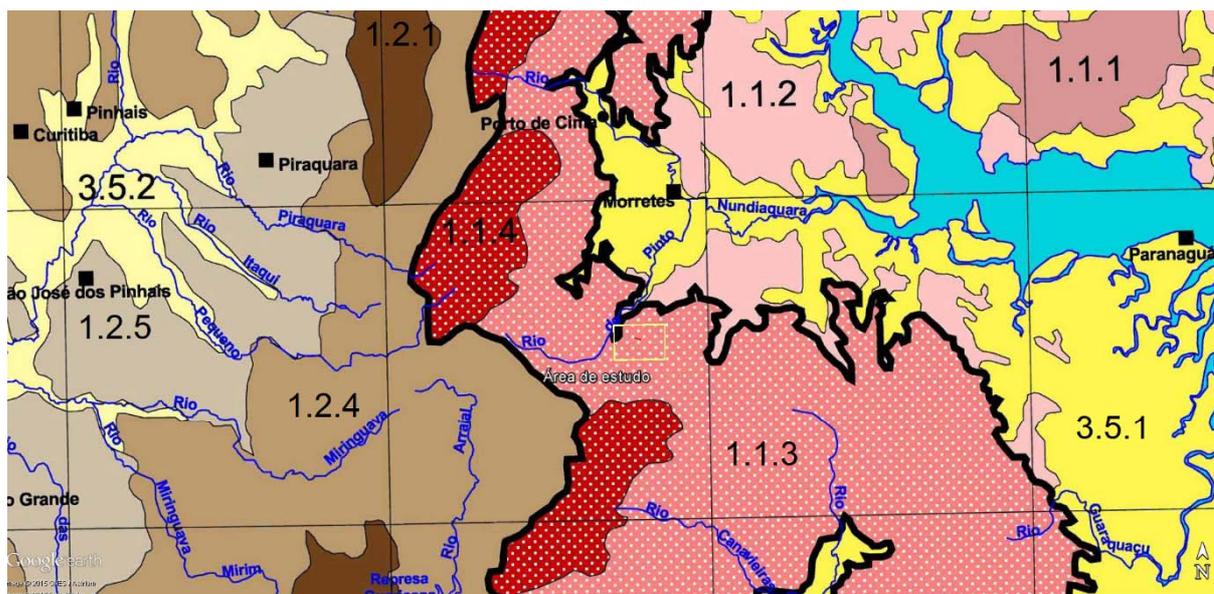
A área de estudo encontra-se dentro do compartimento geológico chamado de Escudo Paranaense, sendo formado pelas rochas ígneas e metamórficas mais antigas e elevadas do Estado do Paraná, que constituem o embasamento da Plataforma Sul-Americana.

Segundo Wolle e Hachich (1989) a Serra do Mar possui um relevo montanhoso e com geologia complexa, localizada no litoral brasileiro entre os estados do Rio de Janeiro e o norte de Santa Catarina. A extensão aproximada da cadeia de

montanhas é de 2000 km, apresentando largura variável entre 5 e 10 km e possui um desnível médio de 1000 m, sendo o ápice localizado no Pico do Paraná, onde a elevação máxima chega a 1969 m de altitude.

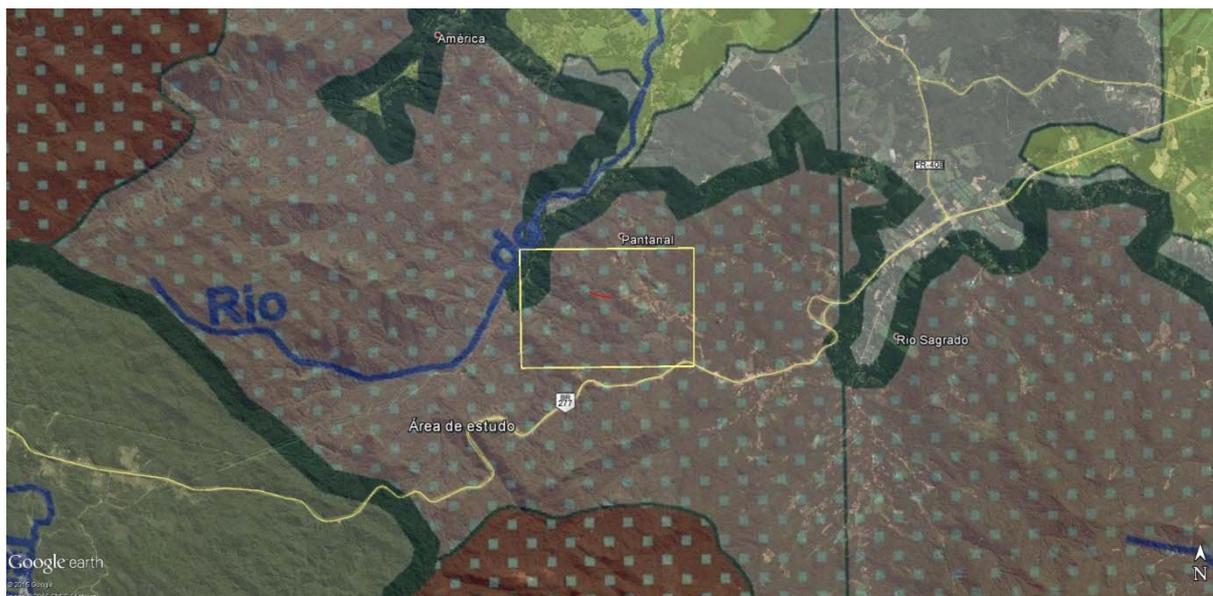
O surgimento da Serra do Mar está relacionado com a separação do paleocontinente Gondwana e o surgimento do Oceano Atlântico. Durante este processo, os granitos foram intrudidos na crosta migmatítica já existente, sendo posteriormente soerguidos por meio de esforços tectônicos e erosivos, gerando a escarpa de falha conhecida como Serra do Mar

Na Figura 18 é possível verificar as unidades geomorfológicas do litoral do estado do Paraná. Na Figura 19 as unidades foram sobrepostas às imagens de satélite da região, destacando-se que a seção de estudo, representada pela linha vermelha, encontra-se dentro da formação 1.1.3 (Serra do Mar).



- 1.1.1 Morros Isolados Costeiros
- 1.1.2 Rampas de Pré-serras e Serras Isoladas
- 1.1.3 Serra do Mar
- 1.1.4 Blocos Soerguidos da Serra do Mar
- 1.2.1 Blocos Soerguidos do Primeiro Planalto Paranaense
- 1.2.4 Planalto de Curitiba
- 1.2.5 Planalto do Alto Iguaçu
- 3.5.1 Planície Litorânea e Planícies Fluvio-marinhas
- 3.5.2 Planícies Fluviais.

**Figura 18 - Mapa geomorfológico parcial do litoral do estado do Paraná. Fonte: Mineropar (2014).**



**Figura 19 - Mapa geomorfológico da área de estudo.**

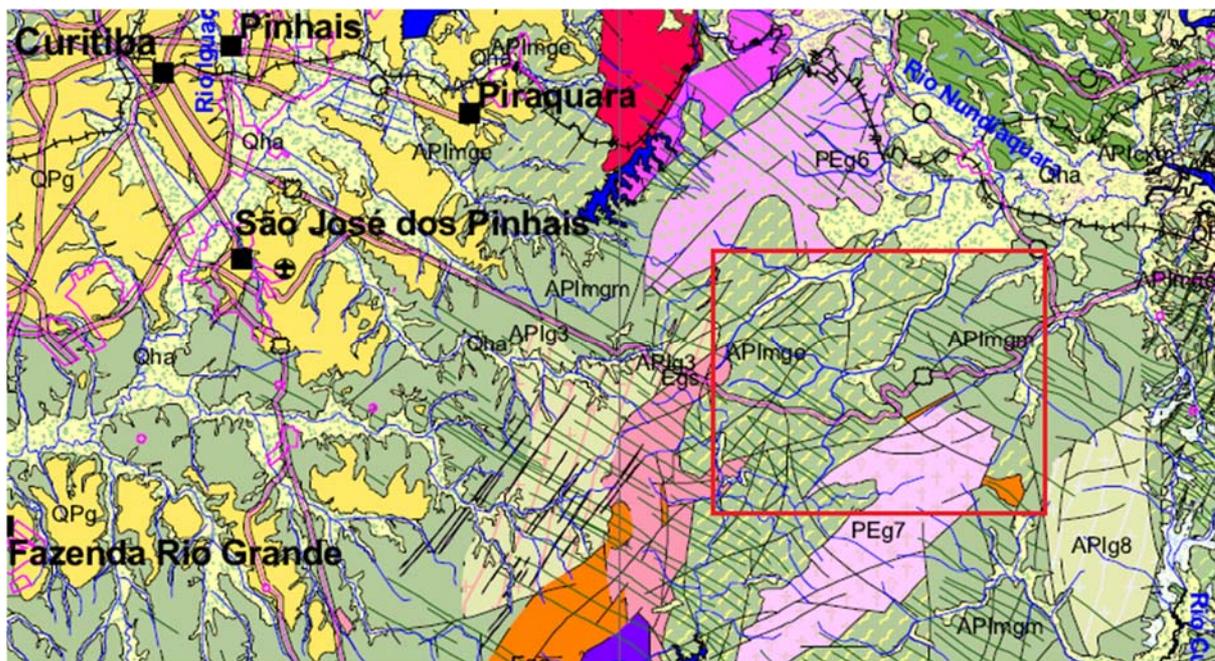
Segundo Suzuki (2004), a região de Morretes/PR é constituída por rochas ígneas e metamórficas do período Pré-Cambriano, compostas por granitos, migmatitos e intrusões de diques de diabásio. Também são encontrados depósitos recentes do quaternário como aluviões, colúvios, sedimentos areno-argilosos de baía e depósitos de tálus (CORDANI e GIRARDI, 1967 *apud* SUZUKI, 2004).

Segundo Nunes (2002), os migmatitos encontrados na região são heterogêneos e estendem-se da região central de Morretes até o extremo sul da bacia do Morumbi, possuem granulação média a grossa e coloração clara em função da sua formação que possui pequenas quantidades de minerais máficos. De acordo com o Atlas Geológico do Estado do Paraná (2001), são associados à anfibolitos, gnaisses graníticos, núcleos de gnaisses granulíticos e rochas máfica-ultramáficas toleíticas. Tem uma estruturação NE-SW, marcada por uma foliação definida por achatamento e estiramento dos minerais.

Segundo Cordani e Girardi (1967), as intrusões de diques de diabásio são provenientes do processo vulcânico mesozóico e estão presentes em toda a área das bacias, cortando as formações de granitos e migmatitos. Estas intrusões apresentam disposições verticais ou sub-verticais em relação as rochas de encaixe, com direção preferencial NW e apresentam colorações que variam de cinza escuro a preto, com granulação variando de média a fina.

A ocorrência de solos residuais na região está associada ao relevo da região, com grandes inclinações e ondulações, características propícias ao escoamento superficial. Os solos residuais de migmatitos, encontrados na região, são caracterizados por cores variegadas, variando de amareladas a branca, apresentando uma matriz bastante argilosa, compacta, de baixa permeabilidade e apresentando comportamento plástico.

Na Figura 20, apresenta-se o mapa geológico da região de estudo, próximo a BR-277, onde o tipo litológico predominante é o migmatito heterogêneo com presença de diques de diabásio. Observa-se também a ocorrência de fraturas em toda a região da Serra do Mar que seguem em direção sudeste.



#### Sedimentos Recentes

Qha - Sedimentos de deposição fluvial (aluviões), com areias, siltes, argilas e cascalhos, depositados em canais, barras e planícies de inundação. Aluviões indiferenciados (areias, argilas e cascalhos).

#### Formação Guaratubinha

Çga - Sequência vulcânica ácida: riolitos, tufo e brechas.

#### Suite Álcali-Granitos

PEg7 - Granito Serra da Igreja.

#### Complexo Gnáissico-Migmatítico

APImge - Migmatitos estromáticos com paleosoma de biotita-hornblenda gnaíse, mica-quartzo xisto, ultrabásito, metabasito e anfibolito.

APImgn - Migmatitos ofáltmicos, com paleosoma de biotita gnaíse, biotita-hornblenda gnaíse e hornblenda gnaíse, localmente com quartzitos.

Figura 20 – Localização da área no mapa geológico. Fonte: Mineropar (2014).

### 3.1.2 Histórico de movimentações

A encosta selecionada apresenta um histórico de movimentações que motivou o desenvolvimento de diversas pesquisas sobre o tema. Na sequência serão descritos os principais eventos registrados na área.

Em março de 1999 foi identificada a existência de trincas superficiais de erosão na parte superior da encosta, conforme mostra a Figura 21 abaixo. Na região inferior da encosta encontra-se instalada uma das principais linhas de dutos, assim como a rodovia federal BR-277 e importantes mananciais que abastecem a região.

Segundo Geoprojetos (2001), o processo erosivo e a abertura de trincas superficiais no terreno eram decorrentes do sistema de drenagem superficial existente, onde parte das águas coletadas eram direcionadas a uma grande região de voçoroca, contribuindo para a continuidade do processo erosivo. Em maio de 1999, iniciou-se o processo de estabilização da encosta, ampliando-se o sistema de drenagem superficial e implantando-se drenos horizontais profundos.

Entre os meses de abril e maio de 2000, iniciou-se um programa de investigação geotécnica, o qual permitiria um maior reconhecimento da região e posterior instalação de um sistema de monitoramento. Nos meses de maio e junho, foram instalados 1 pluviômetro, 11 piezômetros e 6 inclinômetros, concluindo a primeira etapa de instalação dos instrumentos de monitoramento.

Em outubro do mesmo ano, verificou-se através dos instrumentos que a encosta encontrava-se em movimento. Em 16 de fevereiro de 2001, antes mesmo do término da instalação dos drenos horizontais profundos – DHP's, após um período de chuvas intensas, ocorreu uma nova movimentação de massa, provocando um acréscimo de tensão nas paredes do duto, levando-o a ruptura (Figura 22). Cerca de 50 mil litros de óleo diesel vazaram na Serra do Mar, atingindo quatro rios da região.

Segundo CENPES (2001), o afastamento registrado entre as extremidades do duto foi de 32 cm, aumentando após o acidente. A velocidade de afastamento médio entre os dias 17/02/2001 e 22/02/2001 foi de 20 mm/dia, mostrando a continuidade do processo de movimentação.



Figura 21 – Trincas superficiais. Fonte: Vogt (2012).

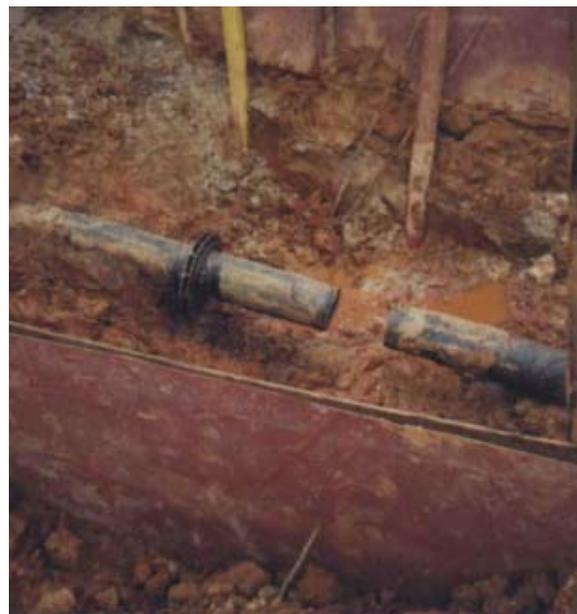
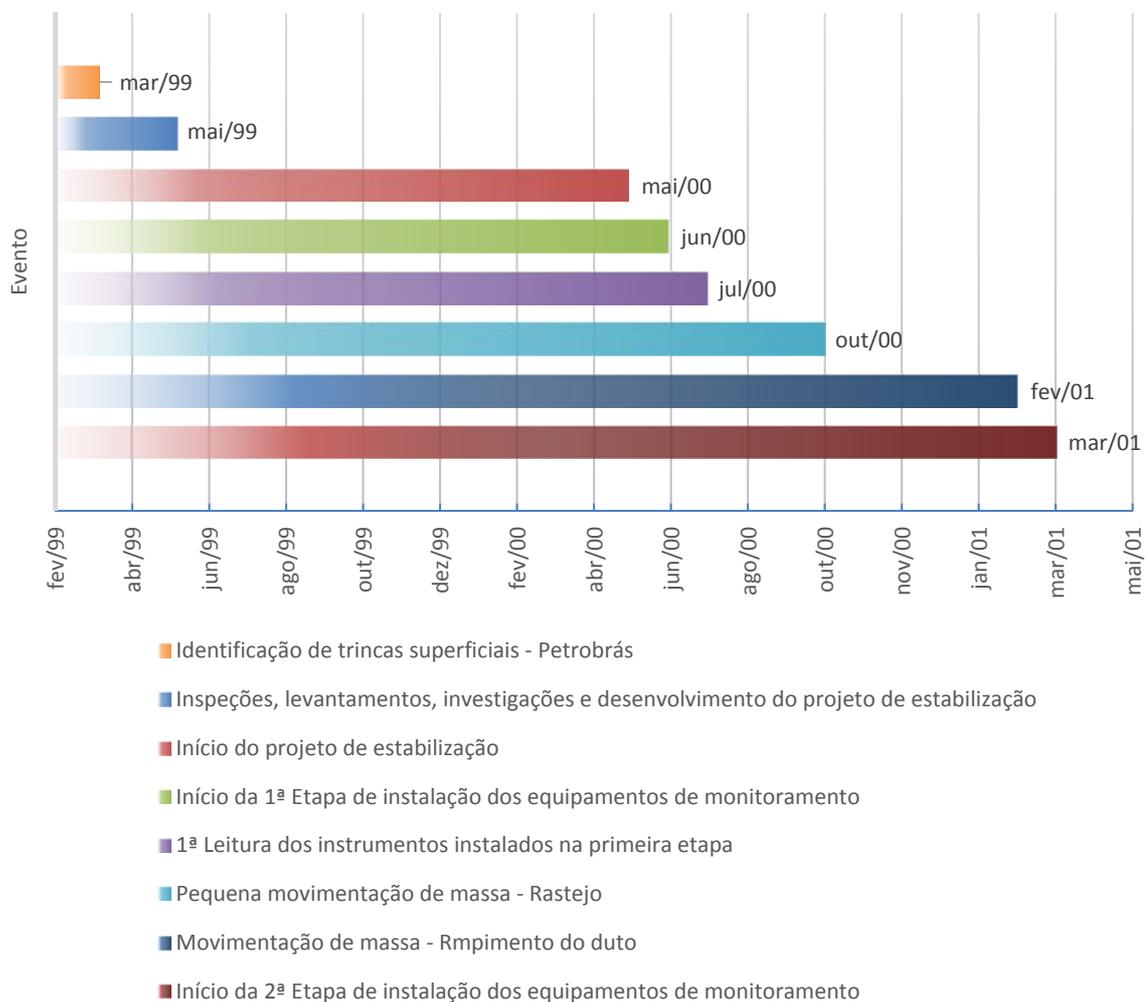


Figura 22 – Ruptura do duto. Fonte: Suzuki (2004).

Após a ruptura do duto, durante novas inspeções identificou-se novas trincas, além das cadastradas anteriormente, indicando a evolução do movimento da encosta. Em março de 2001, iniciou-se a segunda etapa de instalação dos instrumentos de monitoramento, constituída por 8 inclinômetros e 7 piezômetros adicionais.

Na Figura 23 apresenta-se as principais datas assim como uma breve descrição dos eventos identificados.



**Figura 23 – Histórico de movimentações.**

O regime pluviométrico da área é típico de regiões tropicais, com chuvas intensas e longas no período do verão. Para o evento ocorrido em 16 de fevereiro de 2001 a estação pluviométrica registrou 4 dias consecutivos com altas precipitações (140 mm, 20 mm, 90 mm e 80 mm/dia respectivamente) os quais contribuíram no processo de instabilização da encosta.

### 3.1.3 Descrição das causas da ruptura

Segundo CENPES (2001), através da observação das trincas gravitacionais em campo e dos deslocamentos progressivos registrados pelos inclinômetros é possível classificar o deslocamento como “rastejo”.

Segundo o mesmo autor, a falta de indícios diretos do fenômeno rastejo deve-se ao fato de toda a massa de solo estar se movimentando sobre um plano preferencial mais profundo, tangenciando as falhas gravitacionais.

Segundo o relatório CENPES (2001), o rastejamento pode ser influenciado pelo nível d’água, e em épocas de elevada pluviosidade ocorre um aumento na velocidade do movimento. A Figura 24 ilustra um modelo geotécnico do processo de rastejo com formação de trincas e rejeitos de falhas gravitacionais.

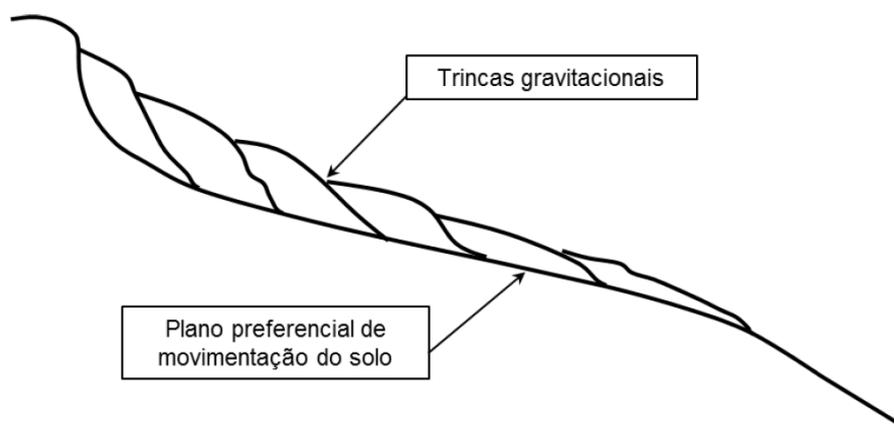


Figura 24 – Modelo geotécnico de rastejo com falhas gravitacionais. Fonte: adaptado de Cenpes (2001).

## 3.2 TRABALHOS ANTERIORES

Conforme apresentado anteriormente, a encosta apresenta um importante histórico de movimentações os quais motivaram o desenvolvimento de várias pesquisas sobre o tema, dentre as quais pode-se citar Suzuki (2004), Vogt (2012) e Farias (2013).

Dados referentes as investigações geotécnicas, resultados dos ensaios de laboratórios e evidências de campos descritas pelos pesquisadores acima, foram analisados, validados e incorporados à presente pesquisa.

### 3.2.1 Investigações geotécnicas

A campanha de investigação geotécnica utilizada para a definição do perfil estratigráfico da encosta foi executada entre os meses de maio e abril do ano de 2000. A campanha era composta por sondagens a percussão (SPT) e sondagens mistas (SM). Não houve coleta de amostras indeformadas para a realização de ensaios de laboratório. A campanha tinha como objetivo principal a verificação e interpretação do perfil geológico-geotécnico da encosta assim como a definição dos níveis freáticos.

Na Tabela 5 estão apresentadas as principais informações sobre as sondagens executadas, como localização, definição do contato solo-rocha e a posição do nível freático. As sondagens foram executadas pela empresa Tecnosolo e totalizam 16 pontos investigados.

Conforme mostra a Figura 25, buscou-se distribuir as sondagens de forma a identificar todos os materiais envolvidos e definir o comportamento freático da região.

Tabela 5 – Informações dos pontos de investigação geotécnica. Fonte: adaptado de Vogt (2012).

Registro	Ident.	Data Boletim	Coordenada (N)	Coordenada (E)	Cota (m)	Tipo	Paralização (m)	Contato Solo-Rocha (m)	Prof. NA (m)
SDN-001	S-01	15/05/2000	7.171.448,700	716.319,810	309,185	Mista	23,03	16,23	NFE
SDN-002	S-02	18/04/2000	7.171.428,890	716.350,980	285,751	Mista	14,00	13,45	0,05
SDN-003	S-03	26/04/2000	7.171.434,680	716.399,230	280,417	Mista	23,00	6,00	NFE
SDN-004	S-04	08/04/2000	7.171.374,130	716.407,820	273,473	Mista	30,82	9,02	NFE
SDN-005	S-05	15/04/2000	7.171.397,720	716.420,270	269,615	Mista	21,12	14,42	NFE
SDN-006	S-06	15/04/2000	7.171.365,970	716.433,190	267,380	Mista	10,00	4,75	NFE
SDN-007	S-07	18/04/2000	7.171.392,500	716.466,690	262,345	Mista	26,00	NFE	NFE
SDN-008	S-08	30/04/2000	7.171.413,290	716.490,660	252,183	Mista	15,50	NFE	2,60
SDN-009	S-09	30/04/2000	7.171.416,280	716.525,420	247,459	Mista	24,50	NFE	NFE
SDN-010	S-10	30/04/2000	7.171.426,330	716.558,490	240,411	Mista	23,50	NFE	NFE
SDN-011	S-11	15/04/2000	7.171.404,690	716.382,330	**	Percussão	6,37	NFE	0,60
SDN-012	S-12	18/04/2000	7.171.406,390	716.383,500	278,4	Mista	14,30	12,60	2,40
SDN-013	S-13	30/04/2000	7.171.434,520	716.401,950	280,256	Mista	15,60	NFE	NFE
SDN-014	S-14	08/04/2000	7.171.400,630	716.422,150	269,480	Mista	26,00	14,50	NFE
SDN-015	S-15	24/05/2000	7.171.451,840	716.320,770	309,183	Mista	22,00	20,00	NFE
SDN-016	S-16	25/05/2000	7.171.428,640	716.449,240	266,063	Mista	26,15	NFE	17,23

NFE – Não foi encontrado.

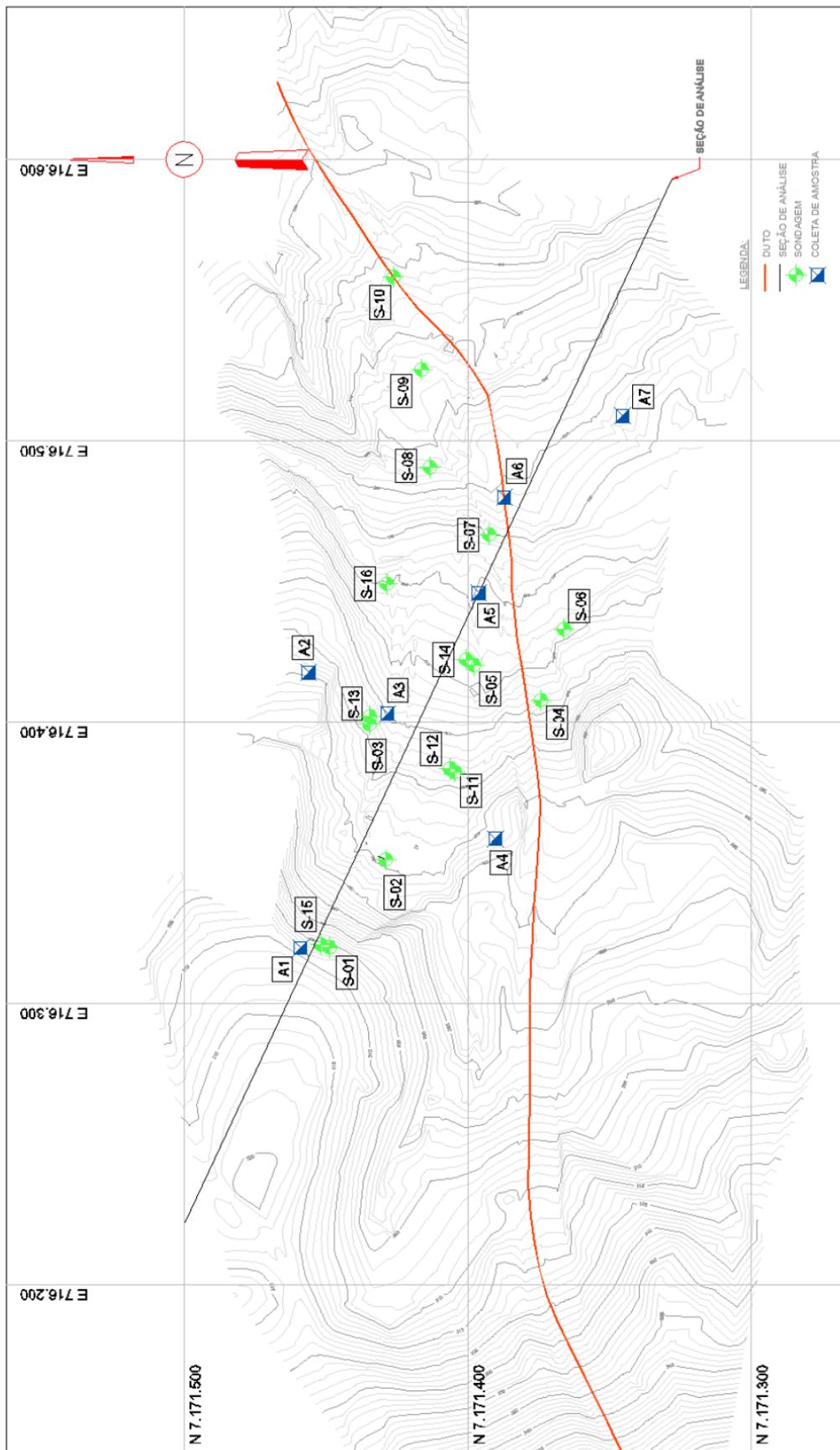


Figura 25 – Planta de locação das sondagens e coletas de amostras indeformadas. Fonte: adaptado de Ufpr (2013).

## Coleta de Amostras

No ano de 2011 novas pesquisas possibilitaram a realização de ensaios de campo e coleta de amostras para realização de ensaios de laboratório. O objetivo desta campanha desenvolvida por Vogt (2012) era aumentar o número de informações a respeito da região, assim como obter novos dados a respeito da caracterização e da resistência dos materiais envolvidos.

A metodologia adotada por Vogt (2012), para a coleta de amostras seguiu os procedimentos descritos na NBR 9604/86 – “Abertura de poços de trincheira de inspeção em solo com retirada de amostras deformadas e indeformadas”.

Procurou-se evitar a ocorrência de amostragem de material orgânico, com presença de raízes. Logo após terminada a escavação, o processo de talhagem do bloco já era iniciado, prosseguindo por mais 10 cm abaixo da sua base, de forma a não seccioná-lo. Na sequência foram parafinados, após acondicionados em caixas de madeira, sendo os vazios preenchidos com serragem, buscando preservar as condições naturais da amostra (Figura 26).

Para a realização dos ensaios de caracterização, amostras deformadas foram retiradas no mesmo ponto de amostragem dos blocos, usando-se sacos de ráfia para o transporte.

Entre os dias 18 de setembro e 22 de outubro de 2011 foram coletadas 6 amostras indeformadas, blocos de 25 X 25 cm e 7 amostras indeformadas de aproximadamente 40 kg cada. As amostras foram nomeadas sequencialmente de A1 a A7.



Figura 26 – Coletas de amostras indeformadas. Fonte: Vogt (2012).

No local escolhido para a coleta da amostra A6, foi observado material arenoso com presença de pedregulhos e de baixa coesão, o que impossibilitou a coleta do bloco indeformado, característica muito comum de solos coluvionares, conforme mostra a Figura 27, abaixo.



**Figura 27 – Coletas de amostras indeformadas. Fonte: Ufpr (2013).**

Após a coleta das amostras as mesmas foram encaminhadas ao Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME da Universidade Federal do Paraná onde os ensaios foram realizados por Vogt (2012).

Após o processo de talhagem os materiais excedentes foram novamente parafinados e acondicionados em ambiente adequado, de forma a preservar ao máximo as características *in situ* das amostras.

Na Tabela 6 estão apresentadas informações importantes a respeito das amostragens, como data e profundidade de coleta, características tátil-visual das amostras, assim como a programação de ensaios de laboratório desenvolvido por Vogt (2012).

Tabela 6 – Informações dos pontos de coleta de amostras. Fonte: adaptado de Ufpr (2013).

Amost.	Data da Coleta	Material	Amostra Deformada						Amostra Indeformada
			Umid. Natural	Massa Específica dos grãos	Peneiramento	Sedimentação	IP	Permeabilidade Carga Constante	Cisalhamento Direto
A1	18/09/2011	Argila Siltosa	x	x	x	x	x	x	x
A2	22/10/2011	Argila Siltosa	x	x	x	x	x	x	x
A3	18/09/2011	Argila Arenosa	x	x	x	x	x	x	x
A4	17/09/2011	Areia Siltosa	x	x	x	x	x	x	x
A5	17/09/2011	Argila Siltosa	x	x	x	x	x	x	x
A6	22/10/2011	Areia siltosa	x	x	x	x	x	x	x
A7	22/10/2011	Areia siltosa	x	x	x	x	x	x	x

### 3.2.2 Ensaios de laboratório com as amostras coletadas

#### Ensaios de caracterização

Com o objetivo de caracterizar os solos na condição natural, Vogt (2012) determinou os parâmetros de peso específico, índice de vazios, grau de saturação e permeabilidade, resultados estes apresentados na Tabela 7, abaixo.

**Tabela 7 – Ensaios de caracterização – condição natural. Fonte: Vogt (2012).**

Amostra	Peso Esp. (kN/m <sup>3</sup> )	Índice de Vazios	Umidade Natural (%)	Grau de Saturação Natural (%)	Permeabilidade K <sub>20</sub> (cm/s)
A1	15,92	1,75	54,20	31,00	1,20 e <sup>-5</sup>
A2	16,16	1,64	40,40	24,60	3,00 e <sup>-4</sup>
A3	14,72	2,17	59,00	24,20	1,10 e <sup>-5</sup>
A4	18,42	0,98	29,80	30,40	8,80 e <sup>-3</sup>
A5	15,80	1,93	58,30	30,20	1,90 e <sup>-5</sup>
A6	-	-	-	-	-
A7	16,19	1,32	40,90	31,00	6,00 e <sup>-4</sup>

As propriedades dos solos foram avaliadas por meio dos ensaios de caracterização que envolveu análise granulométrica por sedimentação e peneiramento, limites de Atterberg, massa específica dos grãos e umidade natural. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 8.

Na Figura 28 estão representadas as curvas granulométricas de cada solo amostrado.

Tabela 8 – Informações dos pontos de coleta de amostras. Fonte: Vogt (2012).

Amost.	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	LP (%)	LL (%)	Umidade Natural (%)	Análise Granulométrica				
					Pedra (>60)	Pedregulho (2,0<%<60)	Areia (0,06<%<2,00)	Silte (0,002<%<0,06)	Argila (<0,002)
A1	2,925	49,00	80,00	54,20	0,00	0,00	11,30	17,80	70,90
A2	3,056	40,00	64,00	40,40	0,00	0,00	24,50	32,60	42,80
A3	3,056	53,00	94,00	59,00	0,00	0,00	18,20	10,50	71,20
A4	2,738	34,00	49,00	29,80	0,00	0,50	49,20	25,60	24,70
A5	2,959	51,00	87,00	58,30	0,00	0,50	12,30	18,80	68,40
A6	2,740	32,00	43,00	-	4,40	0,50	47,50	29,60	18,00
A7	2,736	40,00	51,00	40,90	2,60	0,50	39,00	30,10	27,80

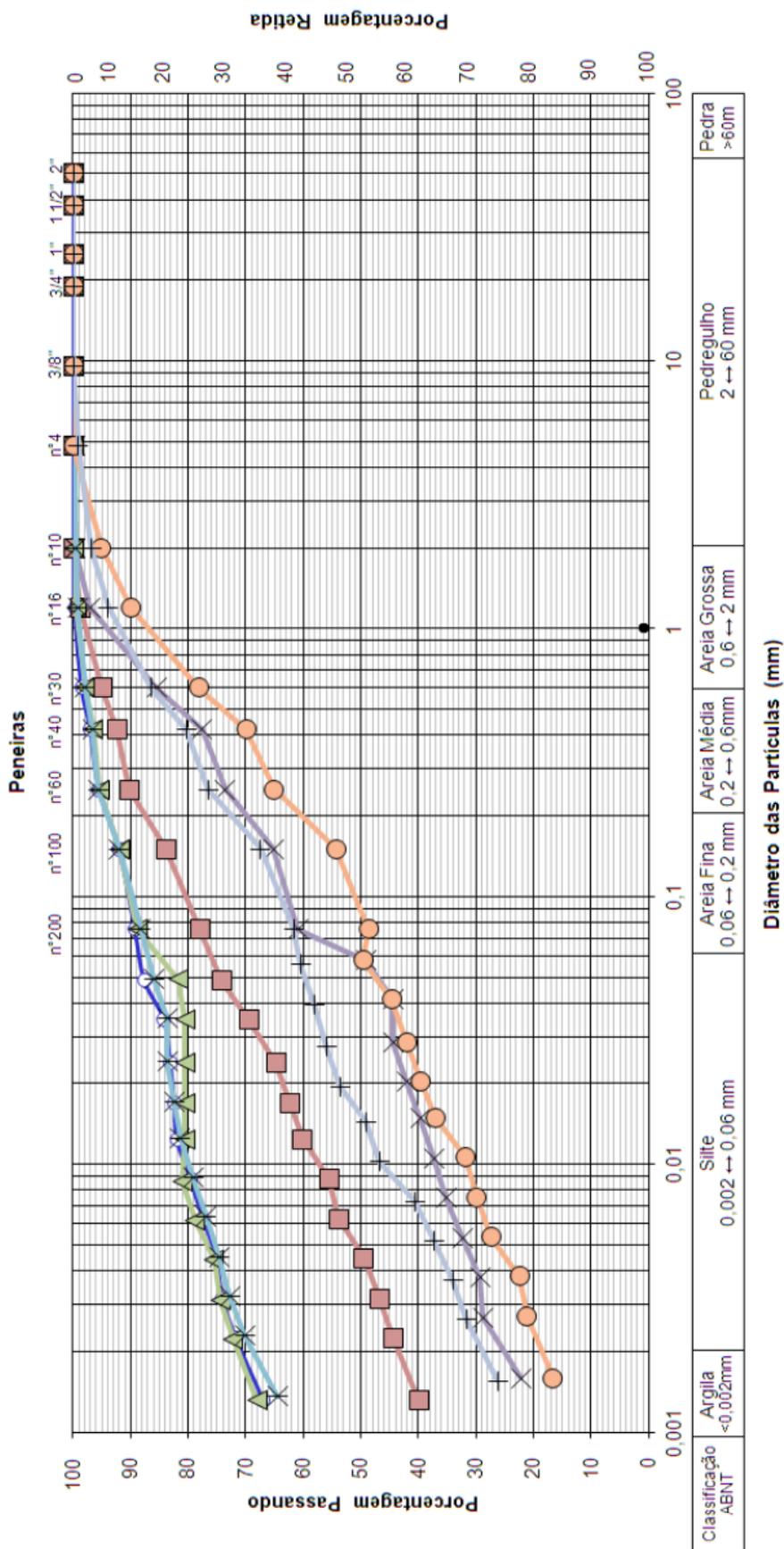


Figura 28 – Coletas de amostras indeformadas. Fonte: Vogt (2012).

Segundo a ABNT, conclui-se que as amostras A1, A2, A5 são classificadas como argila siltosa, as amostras A4, A6, A7 como areia siltosa e a amostra A3 como argila arenosa. Com base nas informações obtidas pelos limites de Atterberg as amostras foram classificadas de acordo com o sistema de classificação unificada dos solos (SUCS), o resumo das classificações pode ser obtido na Tabela 9, abaixo.

**Tabela 9 – Classificação granulométrica. Fonte: Vogt (2012).**

<b>Amostra</b>	<b>ABNT</b>	<b>SUCS</b>
A1	Argila Siltosa	MH – Silte de alta plasticidade
A2	Argila Siltosa	MH – Silte de alta plasticidade
A3	Argila Arenosa	MH – Silte de alta plasticidade
A4	Areia Siltosa	ML-MH – Silte de média plasticidade
A5	Argila Siltosa	MH – Silte de alta plasticidade
A6	Areia siltosa	ML-MH – Silte de média plasticidade
A7	Areia siltosa	ML-MH – Silte de média plasticidade

### Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio teve como objetivo avaliar a resistência ao cisalhamento de pico em termos de tensões totais utilizando o critério de ruptura proposto por Mohr-Coulomb. Os ensaios foram realizados por Vogt (2012) segundo as recomendações da norma BS 1377-7 (BS, 1990).

Os ensaios foram realizados em prensa de cisalhamento direto, tipo deslocamento controlado. Para cada bloco amostrado foram realizados 5 ensaios de cisalhamento direto de seção quadrada com aresta de 100 mm e altura de 20mm. As tensões verticais utilizadas foram as de 13,30 - 25,90 - 37,10 - 59,40 - 104,60 kPa.

A amostra A1 apresentou resistência oito vezes maior quando comparado com as demais amostras. Devido a isso, essa amostra foi desprezada na avaliação dos resultados. As demais envoltórias de resistência foram agrupadas e apresentadas na Figura 29.

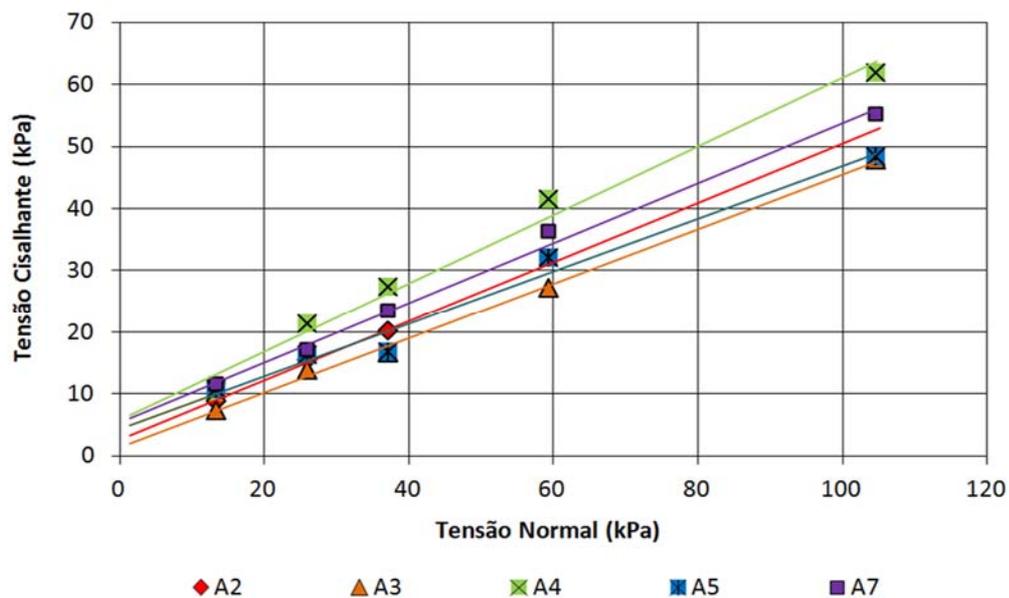


Figura 29 – Envoltórias de resistência. Fonte: Vogt (2012).

Na Tabela 10 estão apresentados os valores de coesão e ângulo de atrito interno das amostras, determinados graficamente, assim como a média dos valores de coesão e atrito.

Tabela 10 – Parâmetros de resistência. Fonte: Vogt (2012).

Amostra	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
A1 (desprezado)	8,40	72,60
A2	2,60	25,60
A3	1,30	23,80
A4	5,80	28,90
A5	4,40	23,00
A7	5,40	25,90
<b>Média</b>	<b>3,90</b>	<b>25,44</b>

### 3.3 ENSAIOS COMPLEMENTARES

Para o desenvolvimento desta dissertação foram necessários ensaios complementares, os quais tinham como objetivo caracterizar o comportamento hidráulico do solo.

Conforme dito anteriormente, o coeficiente de permeabilidade do material e a curva de retenção do solo são parâmetros que permitem melhorar o entendimento do comportamento hidrogeológico do material, ou seja, do fluxo da água em seus vazios. Diante desta necessidade, ensaios para a determinação da curva de retenção foram realizados, de forma a caracterizar e definir as principais características dos materiais envolvidos.

#### 3.3.1 Curva de retenção

O método utilizado para a definição da curva de retenção foi a técnica do papel filtro. A escolha pelo método levou em consideração a relativa simplicidade nos processos de determinação, baixo custo e pela sua aplicabilidade em nível de sucção, ou seja, é possível determinar níveis baixos e elevados de sucção.

O método do papel filtro permite determinar a sucção mátrica e sucção total do material. Quando o papel filtro é colocado em contato direto com o solo, mede-se a sucção mátrica do material, onde o fluxo de água acontece por capilaridade. Para a determinação da sucção total, o papel filtro deve ser colocado próximo à amostra porem não em contato direto. Neste caso, ocorre um fluxo de vapor d'água do solo para o papel.

Selecionou-se as amostras A1, A3 e A5 para a determinação da curva de retenção. Estas amostras foram selecionadas devido à localização de amostragem, ou seja, retiradas próximas à secção crítica da encosta (secção de estudo).

Este trabalho limitou-se apenas à determinação da sucção mátrica dos materiais. Os procedimentos para a determinação da curva de retenção seguiram as recomendações propostas por Marinho (1994).

### Preparo das amostras

As amostras indeformadas encontravam-se no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME da UFPR, acondicionadas em um ambiente escuro, protegidas por gaze e parafina, porém sem controle constante de temperatura e de umidade.

Retirou-se a gaze e a parafina da superfície dos blocos onde foi possível perceber o ressecamento de camadas superficiais das amostras (Figura 30a). Devido à dificuldade em talhar corpos de prova com o material seco, adicionou-se um incremento de umidade nas amostras através a aspersão de água por meio de um borrifador comum (Figura 30b), protegendo novamente as amostras com gaze umedecida por um período de 2 dias.

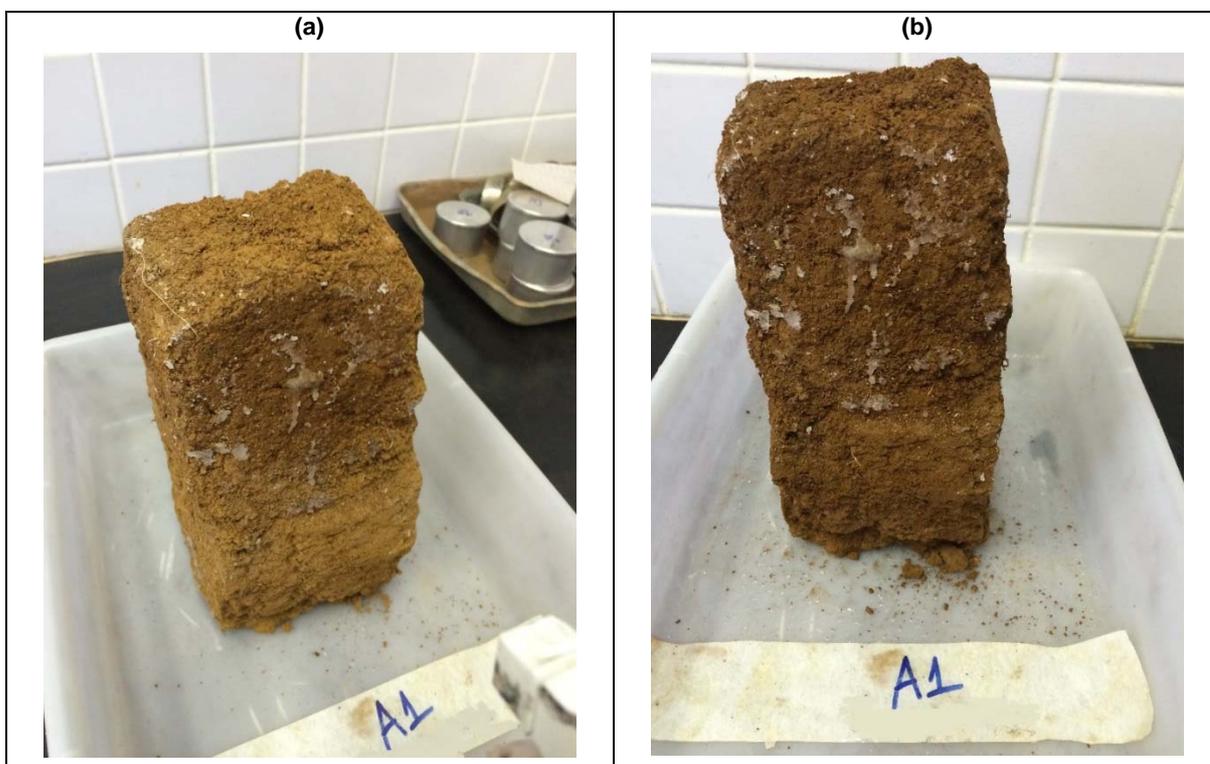


Figura 30 – Amostras indeformadas.

Os corpos de prova foram talhados com a utilização de anéis em aço inoxidável, com diâmetros de 50 mm e altura de 20 mm, sendo que uma de suas extremidades as paredes são biseladas, facilitando o processo de talhagem e reduzindo o índice de amolgamento das amostras.

Para cada amostra indeformada foram previstos 10 corpos de prova, totalizando 30 pontos a serem ensaiados. Para cada corpo de prova, a sucção mátrica foi determinada em ambas as faces do anel, totalizando assim 60 pontos de sucção.

#### Processo de ensaio

Para a determinação da curva de retenção são necessários corpos de prova com diferentes níveis de umidade, de forma a garantir uma boa distribuição de pontos com diferentes níveis de sucção e com isso uma maior representatividade de curva. Com o auxílio de um conta gotas, as amostras foram umedecidas em diferentes umidades com água destilada. A diferença de umidade entre as amostras foi dada através do número de gotas adicionadas (Figura 31).



**Figura 31 – Incremento de umidade – ensaio de sucção.**

Attingido o valor de umidade requerido para cada corpo de prova, procedeu-se a colocação do papel filtro em contato com a amostras. Como o objetivo era apenas a determinação da sucção mátrica do material, o papel foi colocado diretamente em contato com o solo.

Para garantir maior contato entre o papel filtro e a superfície da amostra, os papeis foram recortados com diâmetros ligeiramente inferiores ao diâmetro interno do anel.

Em seguida as amostras foram envolvidas com uma dupla camada de plástico filme e por uma camada de papel alumínio (Figura 32a), todas identificadas e acondicionadas em sacos plásticos de forma a garantir que não haveria perda de umidade durante o processo de equalização (Figura 32b). As amostras devidamente embaladas foram colocadas em uma caixa de isopor a qual permaneceu pelo período de equalização em uma sala com temperatura controlada a 20°C.



Figura 32 – Corpos de prova – ensaio de sucção.

Após o período de equalização de 12 a 15 dias, os papéis foram retirados das amostras e transferidos individualmente para sacos plásticos do tipo *zip lock* (Figura 33a). O processo de manuseio do papel filtro foi feito com o auxílio de pinça e luvas de forma a evitar o contato direto das mãos com o papel.

Antes mesmo do início do ensaio, os sacos plásticos do tipo *zip lock* foram identificados e pesados em uma balança eletrônica, com precisão de 0,0005g, conforme mostra a Figura 33b.

O tempo máximo proposto por Marinho (1994) para a transferência do papel filtro até a colocação no saco *zip lock* foi respeitado, não ultrapassando o limite máximo de 5 segundos. Na sequência, os papéis filtro juntamente com os plásticos *zip lock* foram pesados nesta mesma balança de precisão (Figura 33c). Após a pesagem do conjunto determina-se a umidade retida no papel filtro. Para isso, o papel

é retirado do saco *zip lock*, colocado em uma cápsula de alumínio e levado a uma estufa a 60°C permanecendo por 48 horas (Figura 33d).

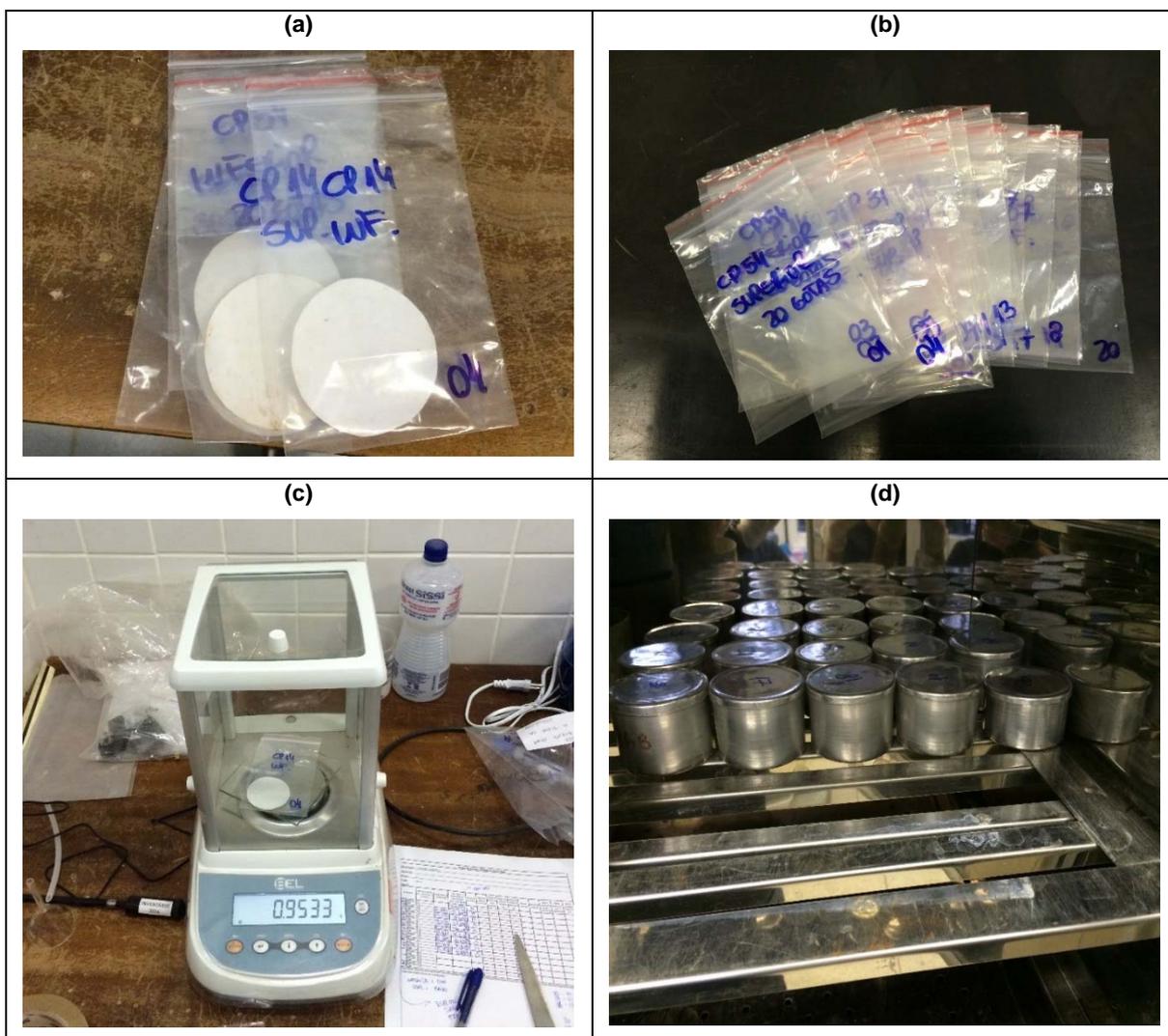


Figura 33 – Processos – ensaio de sucção.

Após o período de secagem em estufa, os papéis retornam aos sacos *zip lock* e novamente são pesados, de forma a garantir que nenhum material retido no saco seja desprezado na determinação da umidade. Determina-se também a umidade de cada corpo de prova, utilizando-se o mesmo procedimento descrito, deixando a amostra por um período de 24 h em uma estufa a uma temperatura de 100°C.

### Determinação dos valores de sucção

O papel filtro utilizado para determinação da curva de retenção foi o Whatman 42, cujas curvas de calibração propostas por Chandler *et al.* (1992) encontram-se representadas pelas Equações 10 e 11.

$$\Psi = 10^{[6,05 - 2,48 \log(w)]}, \text{ para } (w) \geq 47\% \quad (10)$$

$$\Psi = 10^{(4,84 - 0,0622 \cdot w)}, \text{ para } (w) < 47\% \quad (11)$$

Relacionando as sucções determinadas com a umidade volumétrica das amostras tem-se a curva de retenção do material.

Para a amostra A1 o tamanho da amostra não permitia moldar 10 corpos de prova, conforme previa a programação dos ensaios. Outro fato agravante no processo de moldagem foi a perda de material devido ao ressecamento desta amostra.

Devido a isso apenas 4 corpos de prova foram talhados para a amostra A1 e os incrementos de umidade adicionados foram suficientes para caracterizar toda a curvatura da curva de retenção. Conforme mostra a Figura 34, foi possível determinar apenas um ponto de sucção com umidades superiores a 25%.

Os resultados obtidos de umidade volumétrica e sucção foram ajustados pelo método empírico proposto por Fredlund e Xing (1994), com o auxílio do *software* Seep/W (GEO-SLOPE, 2007).

A umidade volumétrica na saturação foi determinada através do índice de vazios das amostras A1, A3 e A5, resultando em 63,64%, 68,45% e 65,87%, respectivamente. Na Figura 34 estão representadas as curvas de retenção ajustadas.

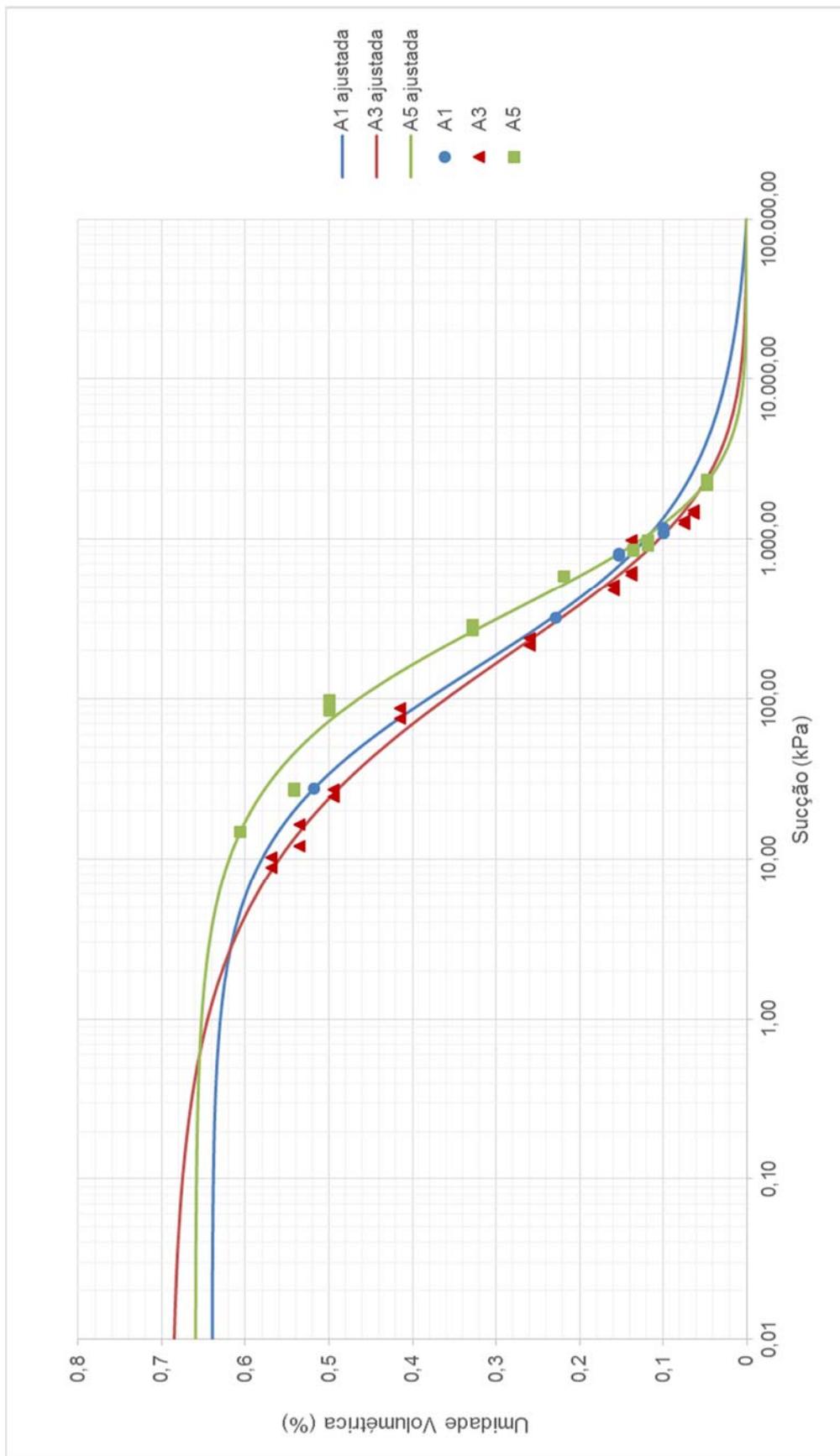


Figura 34 – Curvas de retenção ajustadas por Fredlund e Xing (1994).

Apesar de possuir poucos pontos de sucção e umidade volumétrica conhecida, a curva de retenção A1 apresentou o mesmo comportamento das demais curvas determinadas, confirmando as características já descritas dos materiais.

Na Tabela 11 estão apresentados os coeficientes de ajuste obtidos pelo modelo de Fredlund e Xing (1994), assim como alguns índices físicos determinados a partir das amostras.

**Tabela 11 – Parâmetros de ajustes e índices físicos.**

<b>Amostra/Característica</b>	<b>A1</b>	<b>A3</b>	<b>A5</b>
<b>Material</b>	Argila Siltosa	Argila Arenoso	Argila Siltosa
Índice de vazios	1,75	2,17	1,93
Umidade volumétrica saturada (%)	63,64	68,45	65,87
<b>Parâmetros de ajuste, proposto por Fredlund e Xing (1994)</b>			
<b>a (kPa)</b>	275,09	3.815,00	1.469,70
<b>n</b>	0,7122	0,5377	0,7535
<b>m</b>	3,254	12,425	7,4305

Para ambas as amostras ensaiadas a curva de retenção apresenta o mesmo comportamento físico, registrando-se altos valores de sucção, característica comum dos solos argilosos e siltosos.

Quando comparadas as curvas de retenção dos blocos A3 e A5 percebe-se que para um mesmo valor de umidade, as amostras apresentaram valores de sucção muito semelhante, evidenciando e confirmando que os materiais ensaiados apresentam características muito comuns.

Observa-se através da curva granulométrica, ilustrada na Figura 28, que os materiais A3 e A5 apresentam a mesma distribuição em termos de dimensão dos grãos, sendo que a primeira apresenta uma fração mais arenosa e a última siltosa. Tal evidência justifica os resultados obtidos nos ensaios de sucção, onde o material A5 apresentou valores ligeiramente maiores quando comparados ao solo A3.

Outro ponto de análise são os altos valores de índice de vazios das amostras ensaiadas, sendo de 2,17 para o material A3 e de 1,93 para o material A5. Devida tal característica os valores da umidade volumétrica de saturação das amostras retornaram valores bem elevados, sendo de 69 e 66%, respectivamente.

Outro ponto de observação foram os baixos valores de peso específico dos materiais A3 e A5 (Tabela 7), fato este também justificável pelo elevado índice de vazios observado.

## CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme descrito nos capítulos anteriores, a chuva é um dos principais agentes instabilizantes da complexa formação da Serra do Mar brasileira. Devido tal evidência, o presente trabalho busca avaliar o impacto da consideração de poropressão e fluxo nos fatores de segurança da encosta, buscando verificar até que ponto níveis crescentes de análise se justificam sob o ponto de vista prático da engenharia.

Abaixo serão descritas a metodologia aplicada para o desenvolvimento desta pesquisa, assim como aspectos importantes sobre a encosta.

### 4.1 GEOMETRIA DA ENCOSTA

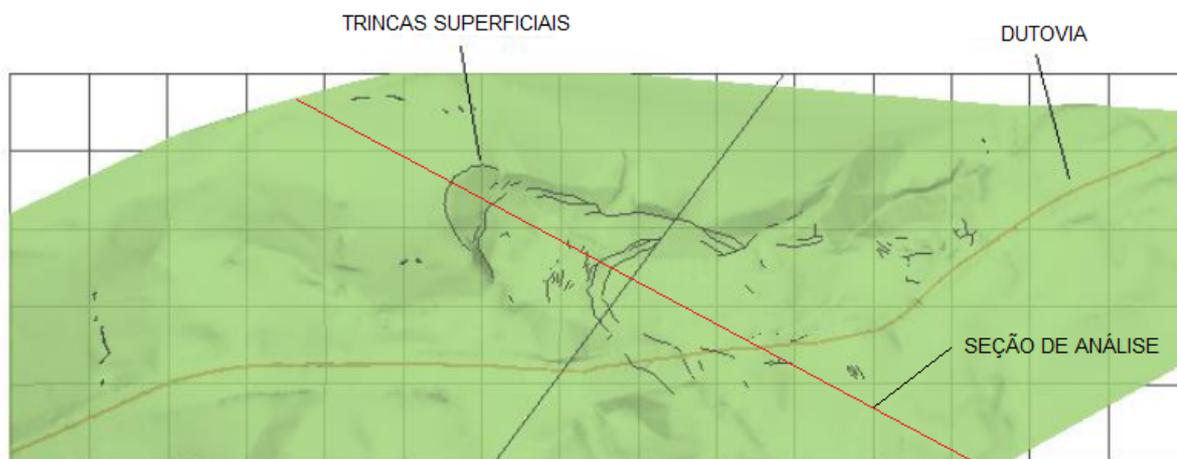
A escolha da área de estudo levou em consideração o interessante histórico de movimentações registrados na região e a quantidade de dados geotécnicos disponível para o desenvolvimento das análises, como dados topográficos, investigações geotécnicas, ensaios de laboratório, dados de instrumentações e de pluviometria.

#### Seção de análise

Para a realização das análises de fluxo e estabilidade foi utilizado uma única seção de análise. Para a definição da seção, os seguintes critérios foram utilizados:

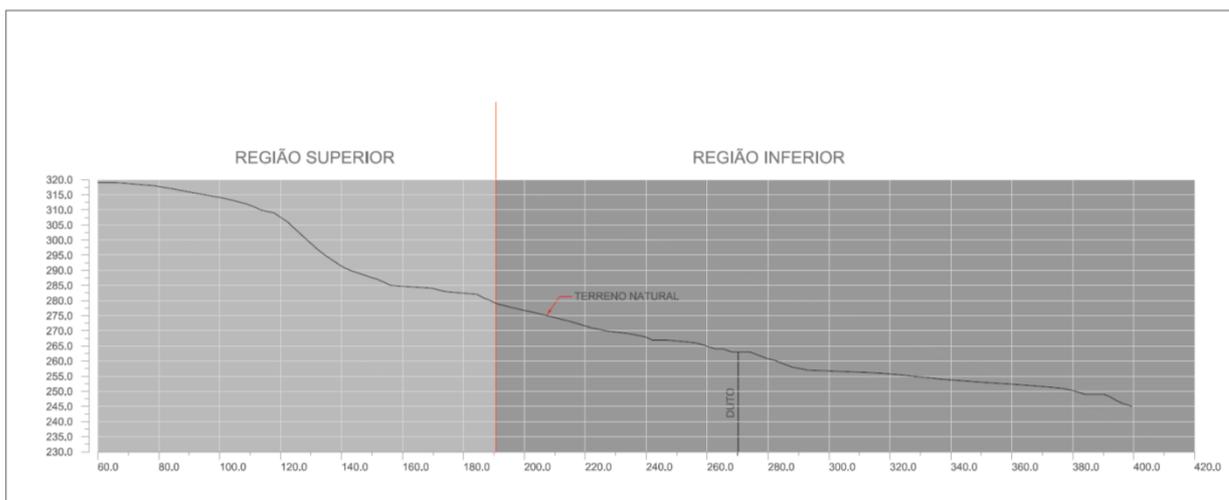
- Direção da superfície de escorregamento, registrado pela instrumentação no ano de 2001;
- Direção do fraturamento e localização de diques de diabásio, observado pela carta geológica do Paraná (MINEROPAR, 2014);
- Maior inclinação e altura do terreno natural, registrado pelos levantamentos topográficos;
- Proximidade com instrumentos de monitoramento, como inclinômetros, piezômetros e medidores de nível d'água.

Para melhor visualização da seção de análise escolhida, locou-se a mesma no modelo desenvolvido por Farias (2013) e que pode ser observado na Figura 36 abaixo. Neste modelo foram locadas as trincas superficiais registradas pela equipe de topografia em campo, onde é possível delimitar uma provável superfície de deslizamento.



**Figura 35 – Seção de análise. Fonte: adaptado de Farias (2013).**

A encosta apresenta elevação máxima de 320 m e mínima de 250 m, totalizando 70 m de diferença de altitude, sendo a inclinação máxima na ordem de 38%, equivalente a  $14^\circ$  (Figura 37).



**Figura 36 – Região superior e inferior da encosta.**

Para a verificação do fluxo e do coeficiente de segurança, a seção de análise foi dividida em duas regiões principais, sendo: região superior da encosta, compreendida entre as elevações 280 e 320 e região inferior, entre as elevações 280 e 250.

### Seção estratigráfica

Na sequência serão descritos os principais aspectos geológicos-geotécnicos, evidenciados pela campanha de sondagem, os quais balizaram a definição da seção estratigráfica da encosta.

Na Figura 25 apresenta-se a planta topográfica da região com a localização da malha de dutos e a locação da seção de análise descrita.

Através da campanha de sondagens realizadas na região identificou-se a existência de um depósito de solo coluvionar, distribuído em camadas de solo argilo-siltoso e silto-argiloso, com presença de matacões, característico de um depósito de talus, preenchendo um talvegue controlado por falhamentos do maciço rochoso (CENPES, 2001).

Através das sondagens traçou-se uma seção geotécnica da encosta, representada na Figura 37, onde a definição dos contatos foi feita através da descrição do material observado pelo sondador e pelo número de golpes encontrados nos ensaios a percussão. Após análises dos boletins das sondagens, três substratos foram identificados.

A camada mais superficial corresponde a um depósito de solo coluvionar com baixos valores de NSPT, variando entre 3 e 15, material este composto por argila siltosa marrom, com espessura variável entre 4 e 20 m. Logo abaixo encontra-se solo residual, com valores de NSPT superiores a 15 golpes, material composto por silte arenoso de cor variegada, com espessura variável entre 10 e 15 m. Sob o solo residual foi encontrada a rocha alterada de migmatito (impenetrável).

Os níveis freáticos registrados pelas sondagens, e apresentados na Tabela 5, são pouco representativos. Para sondagens locadas em uma mesma região os níveis freáticos registrados variam de 0,05 m a 17,23 m. Para as análises de fluxo e estabilidade os dados foram desconsiderados.

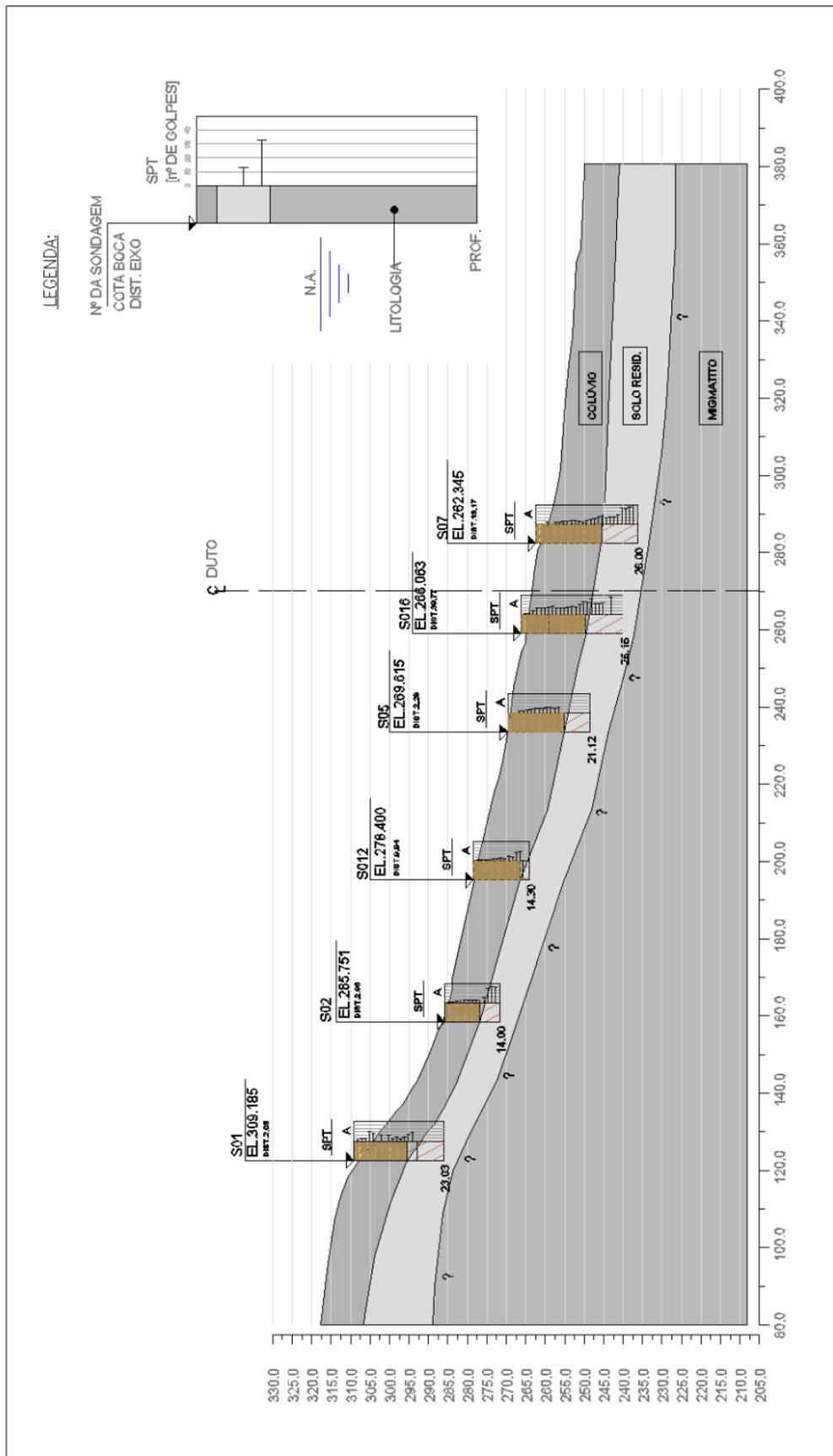


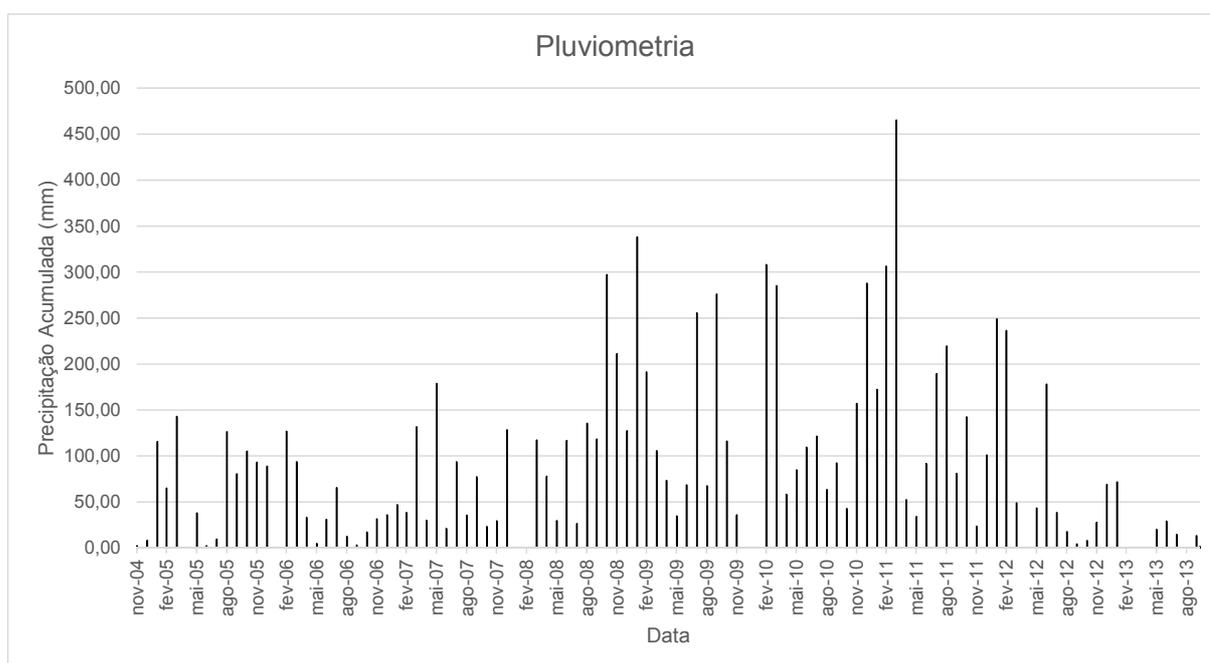
Figura 37 – Seção estratigráfica. Fonte: adaptado de Ufpr (2013).

## 4.2 DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Para a definição da chuva de projeto utilizou-se os dados pluviométricos registrados por um pluviômetro instalado na encosta e de propriedade da empresa operadora da malha de dutos.

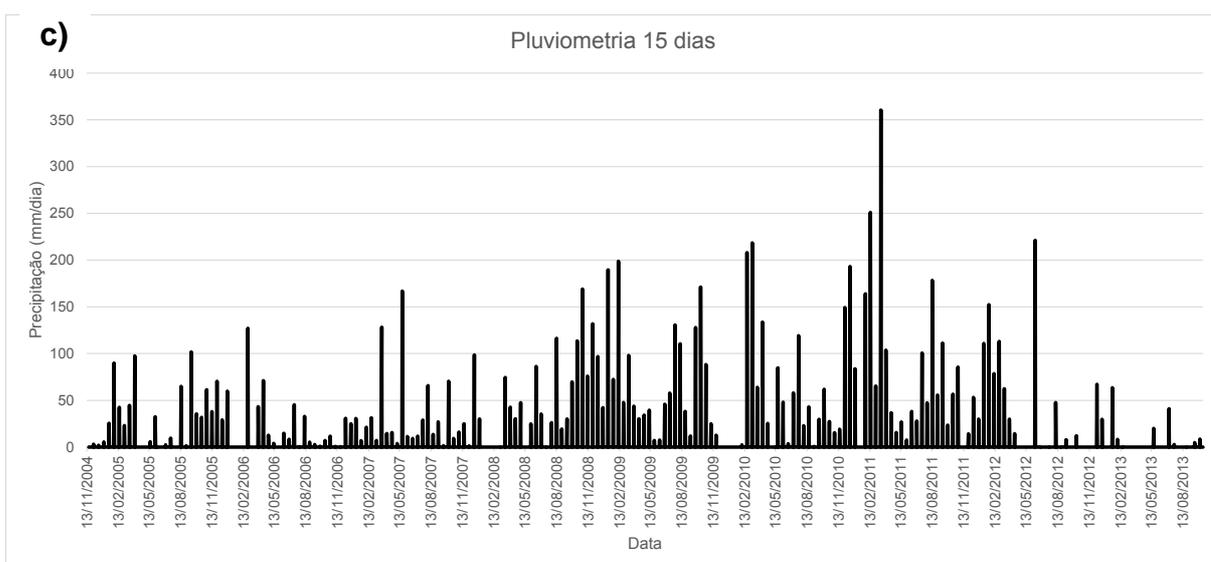
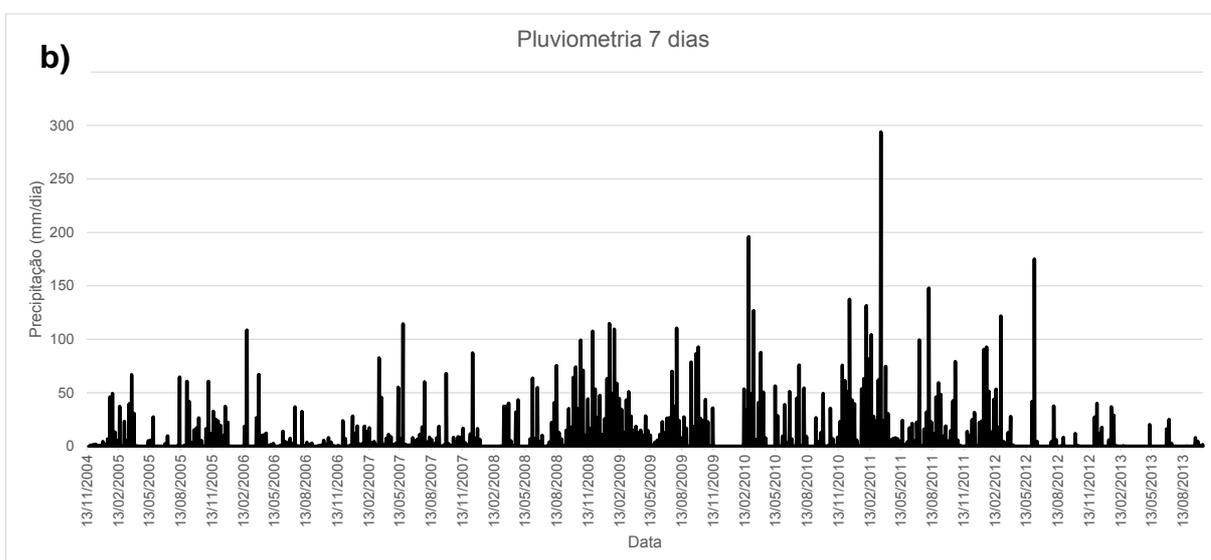
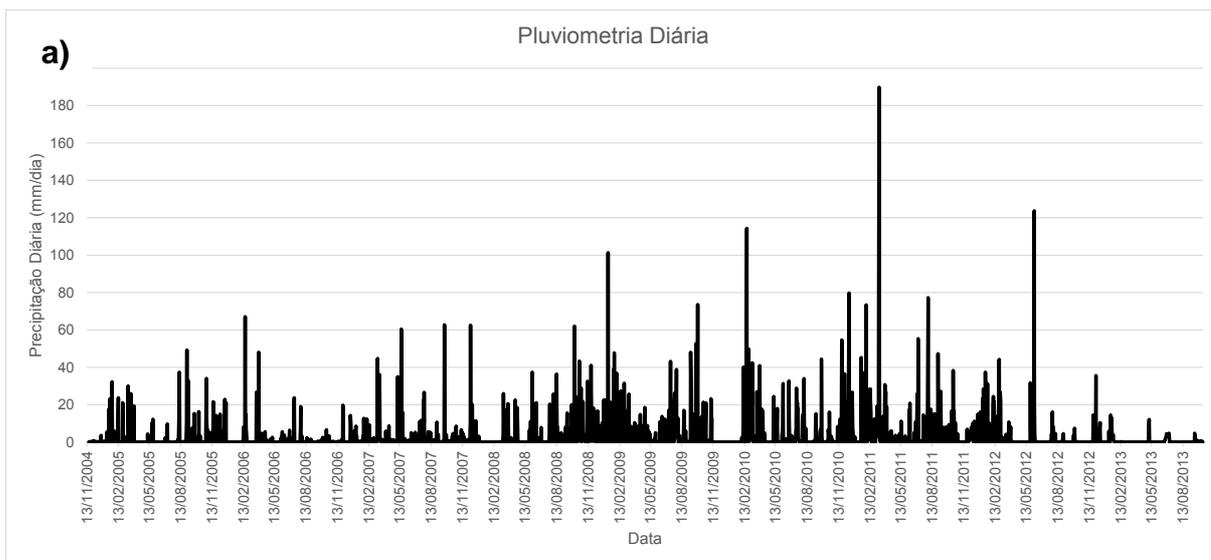
As leituras registradas pelo pluviômetro são leituras diárias e totalizam cerca de 3.300 dados, equivalente a 9 anos de leituras. A série histórica está compreendida entre os meses de novembro de 2004 e outubro de 2013.

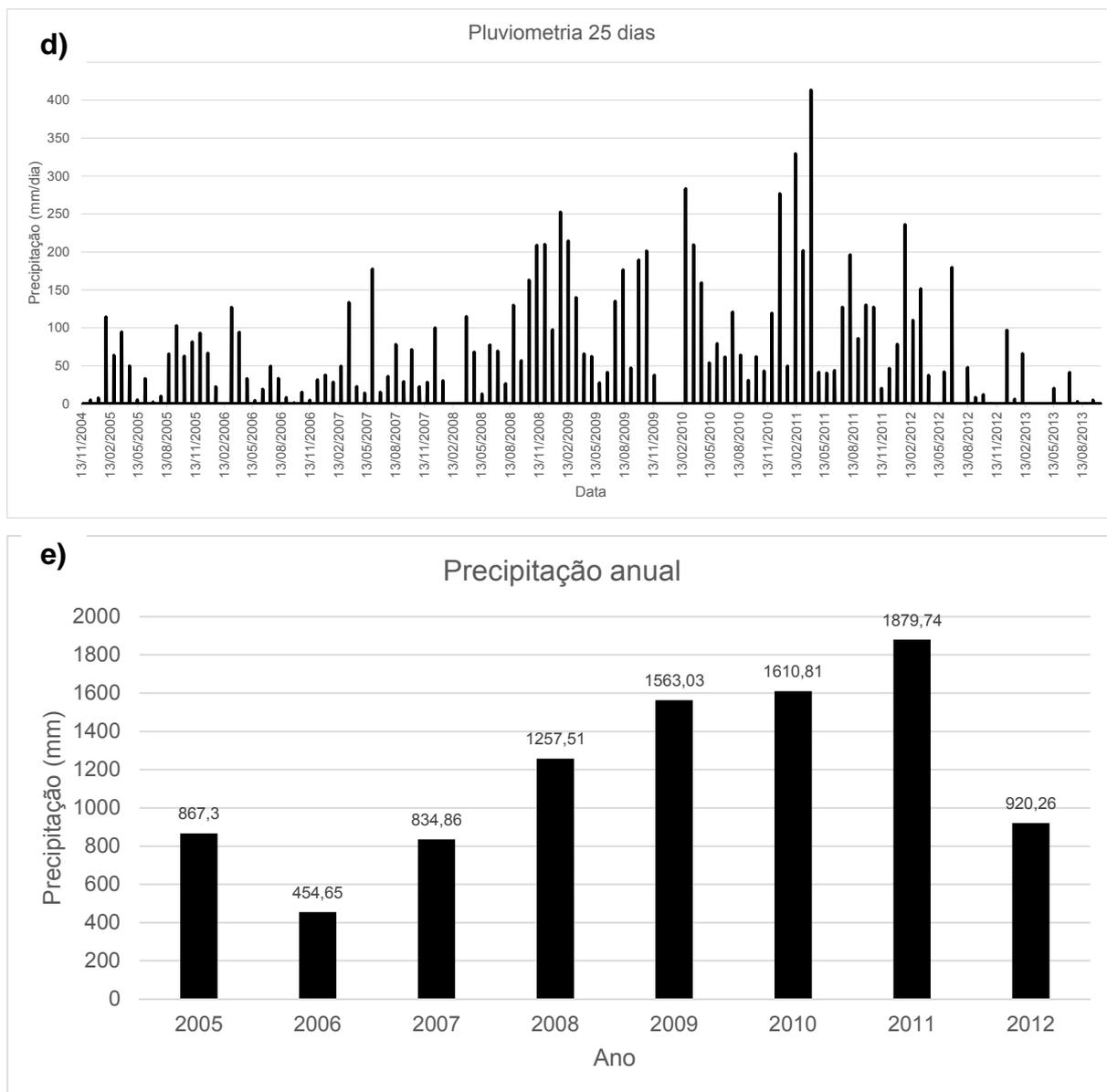
O histograma mensal de pluviometria é apresentado na Figura 38, onde é possível perceber que os períodos chuvosos estão compreendidos entre os meses de janeiro e março. O pluviômetro registrou picos de precipitação nos meses de janeiro de 2009 e março de 2011, apresentando valores de 338,24 e 465,32 mm respectivamente.



**Figura 38 – Histograma de pluviometria mensal.**

Para melhor visualização do comportamento pluviométrico da região, foram geradas as curvas das chuvas acumuladas para 7, 15 e 25 dias, assim como os registros diários e a precipitação anual (Figura 39).





**Figura 39 – Histogramas de pluviometria.**

Os valores referentes às precipitações anuais dos anos de 2004 e 2013 não foram representados, pois os registros não completavam um ano completo de leituras.

Pedrosa *et al.* (1988) e Schilling (1993) analisaram os eventos de instabilização ocorridos na encosta de Soberbo, localizada no Alto do Boa Vista/RJ e concluíram que a chuva acumulada de 25 dias seria a mais representativa para explicar os escorregamentos.

Através dos gráficos apresentados percebe-se que no ano de 2011 foram registradas as maiores precipitações diárias, resultando em valor acumulado de 1.879,74 mm ao ano.

O alto valor acumulado no ano de 2011 é decorrente de chuvas intensas, em destaque para o mês de março, o qual registrou 465,32 mm em apenas 30 dias, ou seja, 25% do valor registrado para o ano todo. Destaca-se 11/03/11 como o dia de maior precipitação, atingindo o pico de 189,67 mm em apenas 24 h.

### Chuva de projeto

Para o desenvolvimento desta pesquisa selecionou-se uma chuva representativa, a qual será descrita no texto como chuva de projeto.

A chuva de projeto foi registrada entre os dias 28/02/2011 e 19/03/2011 e apresenta a maior precipitação diária de toda a série histórica. Na Figura 40 é apresentada a chuva de projeto, a qual possui duração de 20 dias e será descrita no texto como Chuva 1.



Figura 40 – Chuva de projeto.

### 4.3 INSTRUMENTAÇÃO

Conforme já descrito, a região de estudo possui uma série de instrumentos em permanente funcionamento, os quais permitem o monitoramento da estabilidade da encosta. A instrumentação é composta por 29 piezômetros de tubo aberto, ou Casagrande, 19 inclinômetros e uma estação pluviométrica (Figura 41).

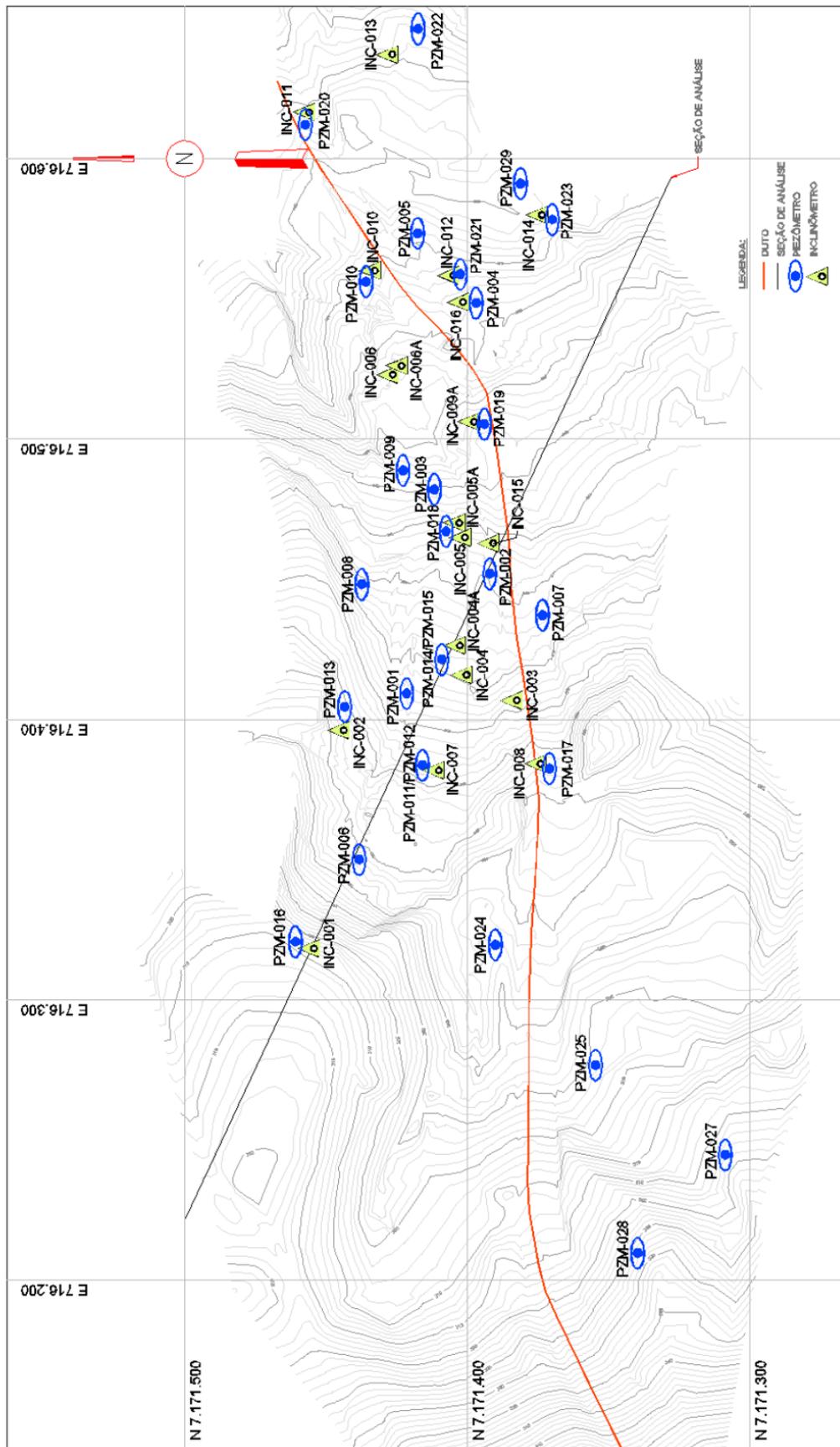


Figura 41 – Instrumentação. Fonte: adaptado de Ufpr(2013).

Na Tabela 12 estão apresentados os seguintes dados piezométricos:

- Cota de instalação dos instrumentos;
- Registro mínimo e máximo de leituras;
- Média das leituras históricas;
- Dados registrados no mês de março de 2011 (chuva de projeto).

**Tabela 12 – Nível d'água da encosta. Fonte: adaptado de Ufpr(2013).**

Instrumento	Cota de Instalação (m)	Registro Mínimo	Registro Máximo	Média dos Registros	Leitura Chuva 01 03/2011
PZM-001	273,360	257,580	273,360	261,620	262,216
PZM-002	264,290	245,210	255,350	251,480	252,667
PZM-003	256,320	239,300	256,320	241,040	241,004
PZM-004	245,180	231,140	233,290	232,250	232,988
PZM-005	240,300	225,570	227,690	226,780	227,184
PZM-006	287,630	276,330	287,630	276,080	-
PZM-007	268,030	259,630	266,970	264,150	-
PZM-008	266,820	241,470	264,280	248,000	-
PZM-009	252,290	238,340	252,290	241,650	-
PZM-010	241,050	220,650	228,420	227,490	-
PZM-011	279,230	261,710	277,500	276,300	-
PZM-012	279,200	264,300	277,430	275,700	-
PZM-013	281,120	261,120	271,020	269,320	-
PZM-014	270,250	259,450	270,250	262,050	-
PZM-015	270,240	250,240	270,240	260,300	-
PZM-016	310,150	287,690	310,150	290,330	-
PZM-017	283,370	270,220	278,850	273,250	-
PZM-018	262,710	237,210	260,710	247,860	-
PZM-019	252,640	236,740	244,950	243,270	-
PZM-020	232,690	210,690	229,390	224,410	-
PZM-021	242,960	222,960ç	232,950	231,140	-
PZM-022	229,400	217,930	229,400	219,190	-
PZM-023	237,040	219,840	232,670	229,200	-
PZM-024	293,580	267,180	290,380	287,510	-
PZM-025	301,930	279,760	297,030	292,870	-
PZM-026	306,540	286,870	302,430	299,880	-
PZM-027	306,540	286,440	306,540	289,030	-
PZM-028	320,950	295,780	317,500	305,270	-
PZM-029	235,450	222,270	232,010	227,330	-

Os valores médios dos dados piezométricos apresentados na tabela, foram utilizados para a definição do perfil inicial de pressão para as análises de fluxo estacionário e transiente, os quais serão apresentados na sequência.

Apresenta-se também, na mesma tabela, os valores das cargas piezométricas registradas no mês da chuva de projeto, ou seja, março de 2011.

O tratamento estatístico utilizado para a definição dos valores médios das leituras piezométricas considerou as seguintes etapas: para cada valor individual foram calculados a média aritmética, o desvio padrão e o intervalo de aceitação, através das seguintes expressões numéricas:

Média:

$$\bar{X} = \frac{\sum n}{n} \quad (12)$$

Desvio Padrão:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (13)$$

Intervalo de aceitação:

$$\bar{X} - ZS \leq i \leq \bar{X} + ZS \quad (14)$$

Onde Z é estimado em função do número de amostras, através da Tabela 13.

**Tabela 13 – Parâmetro de ajuste.**

N	Z
3	1,00
4	1,50
5 - 6	2,00
7 - 19	2,50
> 20	3,00

Assim, a média das leituras foi calculada através da seguinte equação:

$$F_h = \bar{X} - \frac{1,29 S}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

Pode-se perceber que a freática inferida através dos dados piezométricos não apresenta o mesmo comportamento e geometria do terreno natural (Figura 42). Os níveis d'água registrados para o terço superior e inferior da encosta apresentam leituras muito baixas, medindo uma pressão d'água muito profunda, com valores superiores a 20 m de profundidade. Já no terço média da encosta percebe-se uma freática mais alta, com valores muito próximos à superfície do terreno.

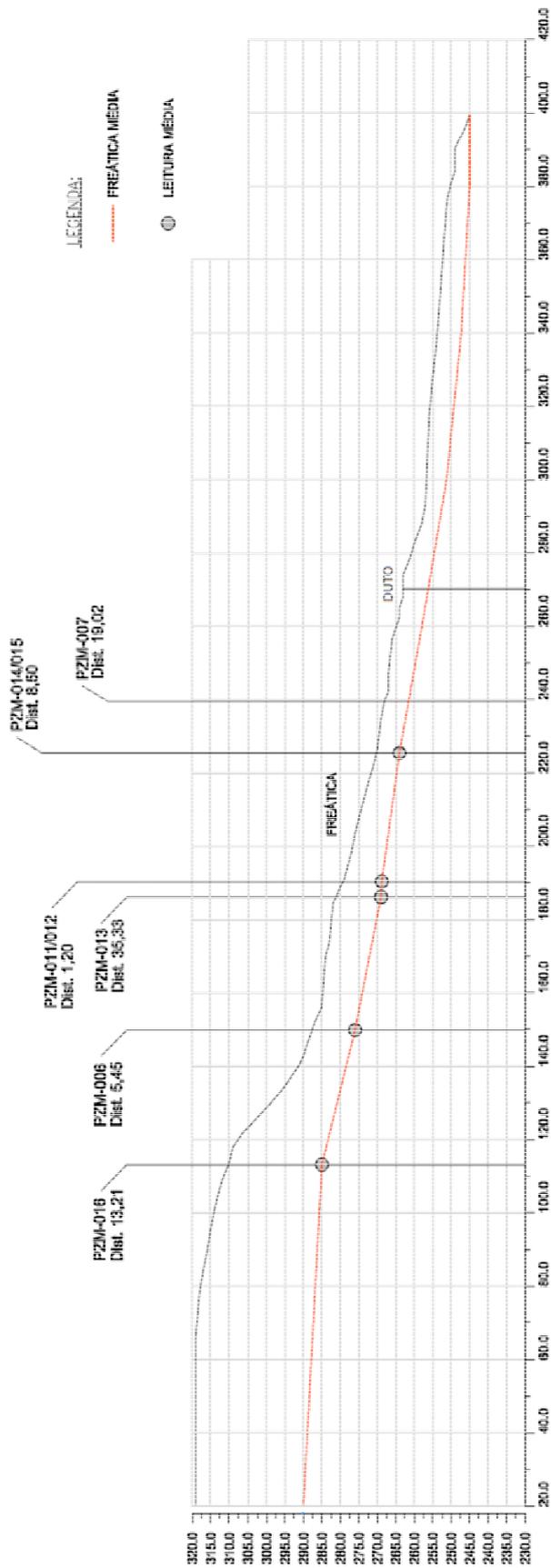


Figura 42 – Linha freática média.

#### 4.4 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS

Conforme apresentado nos itens anteriores, foram identificados os seguintes tipos de solos na seção de análise:

- Material 1 – Colúvio;
- Material 2 – Solo Residual;
- Material 3 – Rocha Alterada Migmatito.

Na Tabela 14 estão apresentados os parâmetros geotécnicos utilizados para cada material identificado.

**Tabela 14 – Parâmetros geotécnicos.**

Solo	Descrição	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Referência
Material 1	Colúvio	14,72	4,00	26,00	Vogt (2012)
Material 2	Solo Residual	18,00	9,00	31,00	Tonus (2008)
Material 3	Migmatito	18,00	15,00	35,00	Tonus (2008)

Para a definição dos parâmetros geotécnicos da camada superficial, também identificada como Material 1, ou colúvio, utilizou-se os resultados dos ensaios de laboratório apresentados no item 3.2.2, do presente documento.

Como as amostras coletadas foram retiradas a profundidades inferiores a 1m (Tabela 6), os resultados obtidos são representativos apenas para as camadas mais superficiais de solo, ou seja, camada de coluvionar.

Portanto, para a definição da coesão e do ângulo de atrito do material, utilizou-se a média dos valores encontrados para as 6 amostras ensaiadas. O peso específico utilizado foi o mesmo encontrado para a amostra A3, amostra representativa da seção de análise. Vale lembrar que o ensaio de cisalhamento foi feito com a amostra submersa, o que não garante a sua saturação.

Os parâmetros utilizados para os Materiais 2 e 3 são valores característicos de solos residuais encontrados em regiões de serra. Os valores definidos são os mesmos já utilizados por Tonus (2008), em um estudo de caso desenvolvido em uma encosta natural, também localizada na Serra do Mar do estado do Paraná.

Reforça-se que o objetivo do trabalho não envolve a verificação da estabilidade da encosta, e sim a influência da consideração da poropressão e do fluxo na análise de estabilidade de uma encosta específica, portanto a adoção de valores médios de coesão e ângulo de atrito atendem ao objetivo proposto, não tendo-se buscado realizar ensaios adicionais de resistência.

#### 4.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO E PARÂMETROS HIDRÁULICOS

A encosta natural foi discretizada segundo a malha de elementos finitos apresentadas na Figura 43. A malha utilizada foi a quadrada com arestas de 2 m.

Afim de identificar e compreender o desenvolvimento das poropressões no interior do maciço, uma seção de medição de poropressão foi locada no modelo. A seção encontra-se localizada na porção média/superior do talude, conforme mostra a imagem abaixo.

Esta seção foi selecionada por representar de maneira satisfatória o comportamento do perfil de pressão de água em outras regiões do talude, porém o comportamento observado pode ocorrer em momentos distintos para cada parte do talude, uma vez que a distância entre a superfície de fluxo e o nível freático não é a mesma para todas as regiões do talude.

Foram registradas leituras na superfície do terreno natural, referente a elevação 290,50 m e a cada 0,50 m de profundidade, limitando as leituras no contato solo/rocha.

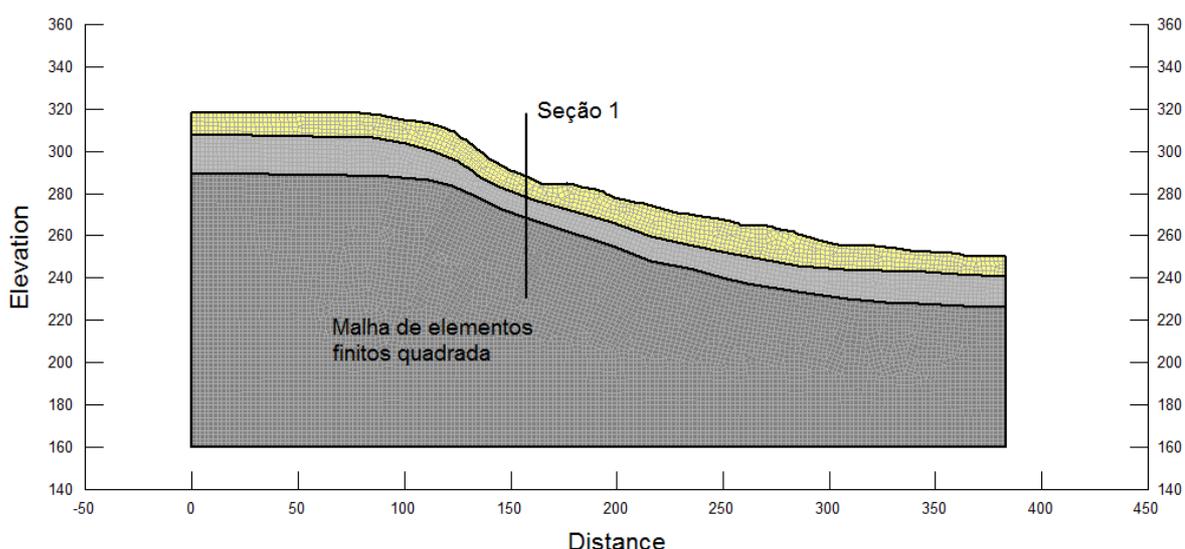


Figura 43 – Malha de elementos finitos e seção de medição de poropressão.

### Condições de contorno

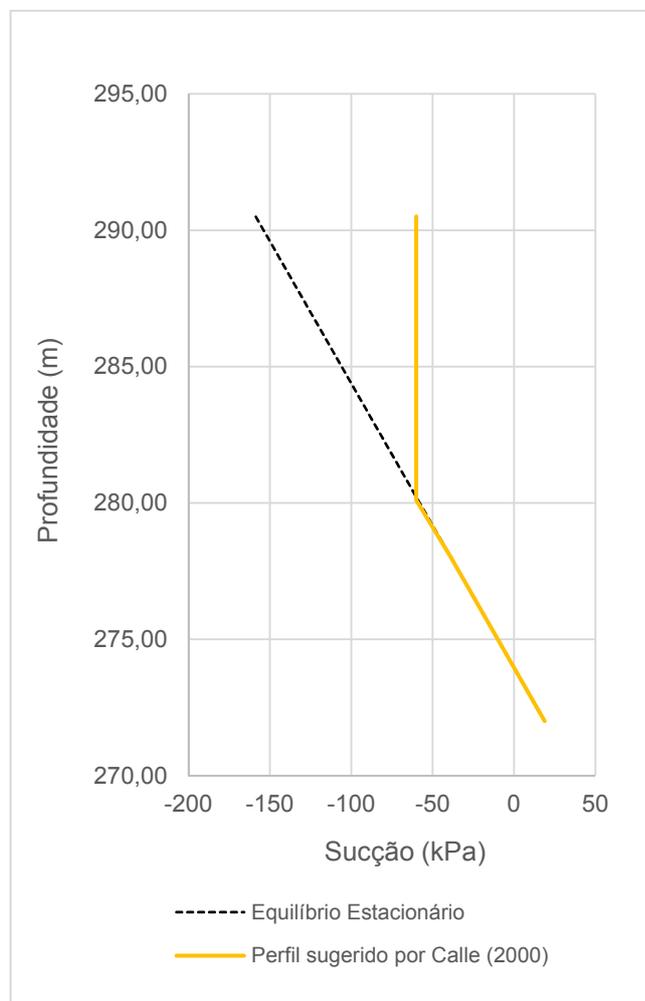
Para a condição de fluxo o perfil inicial de pressão foi definido através de dados piezométricos. Inferiu-se como condição inicial de pressão a freática média determinada no item 4.3 da presente pesquisa.

Na análise de fluxo estacionário, para obtenção do perfil de pressão inicial, utilizou-se a condição de carga total ( $H$ ) atribuindo valores às condições de montante e de jusante da encosta, até a estabilização da linha freática e dos níveis de sucção iniciais.

Segundo Calle (2000), para uma encosta natural com as mesmas características geológicas-geotécnicas o nível de sucção das camadas superficiais varia entre 50 e 60 kPa, conforme perfil apresentado na Figura 44. Os valores sugeridos por Calle (2000) foram determinados através de medições *in situ* de sucção, como a utilização de tensiômetros digitais, em taludes naturais localizados em região de serra no estado de São Paulo.

Na Figura 44, através da linha tracejada preta, é apresentada a condição de equilíbrio estacionário, onde a poropressão varia linearmente até a superfície do terreno natural, chegando a registrar níveis de sucção de até 160 kPa, ou seja, valores

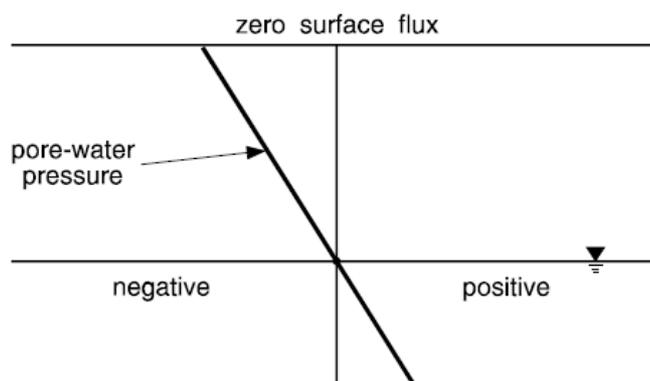
muito acima do observado. Buscando evitar esta condição, buscou-se equalizar os níveis de sucção entre os valores sugeridos por Calle (2000).



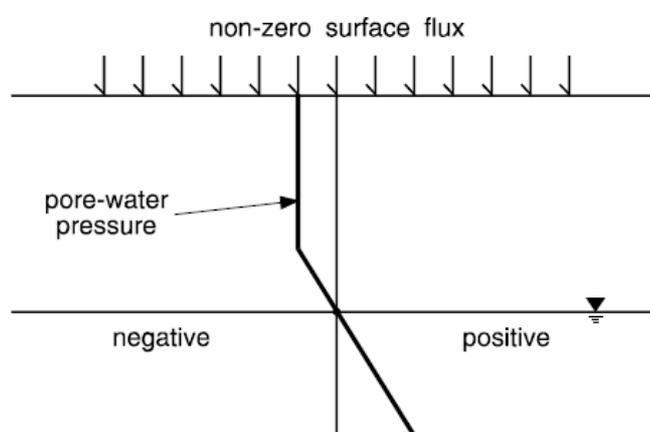
**Figura 44 – Perfil de poropressão inicial.**

Segundo o Manual do *software* Seep/W (GEO-SLOPE, 2004), não há regras rígidas para a estabilização dos níveis de sucção, sendo necessário a variação dos parâmetros até que uma solução razoável seja atingida.

Para limitar os níveis de sucção o manual do *software* sugere a inserção de um fluxo inicial ( $q$ ) ao modelo, ou seja, uma precipitação de pequena intensidade, de forma a limitar os níveis de sucção nas camadas superficiais, conforme representa a Figura 45.



(a) Pore-Water Pressure with Zero Surface Flux



(a) Pore-Water Pressure with Non-Zero Surface Flux

Figura 45 – Equalização dos níveis de sucção. Fonte: Geo-Studio (2004).

Variando as condições de carga total (H) de montante e a intensidade de precipitação inicial, aplicada ao modelo, buscou-se limitar a sucção a 60 kPa. Porém, devido à baixa permeabilidade do material que compõem as camadas superficiais do talude (matriz argilosa), os níveis de sucção foram estabilizados em 80 kPa, com uma precipitação constante de  $4,00 \text{ e}^{-9} \text{ m/s}$ , aplicada na superfície do terreno natural.

As condições de montante e jusante foram definidas com carga total (H) de 295 e 240 m respectivamente.

Na Figura 46 é apresentado o perfil de sucção inicial aplicado ao modelo estacionário, conforme descrito acima, onde cada linha representa a variação de 50 kPa de poropressão.

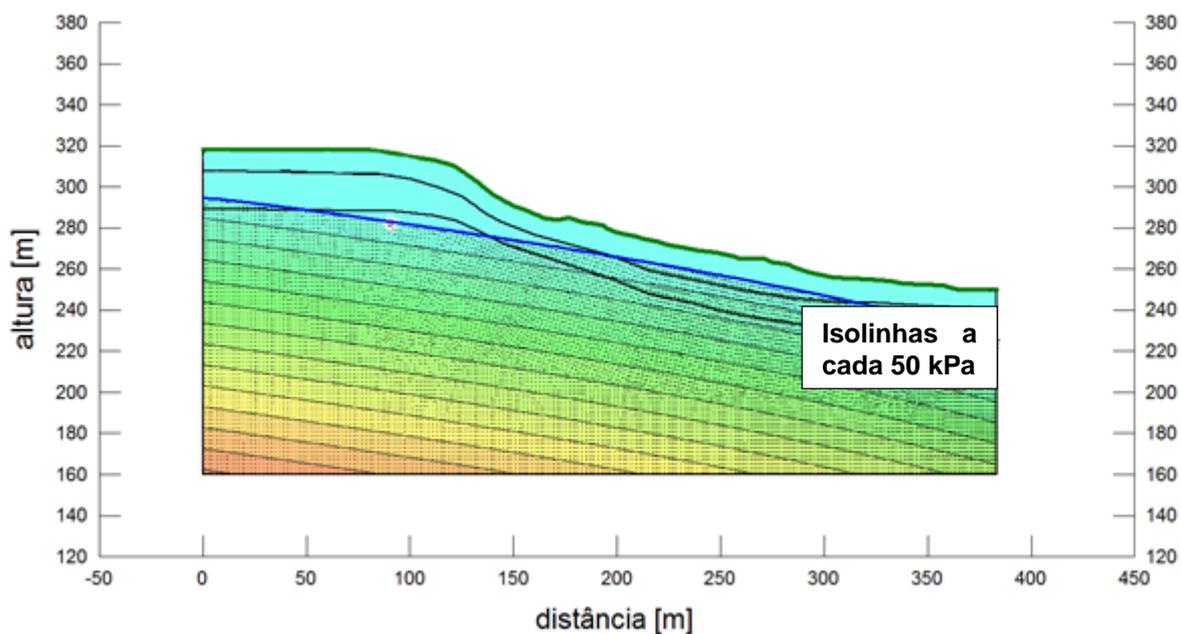


Figura 46 – Perfil de sucção inicial.

O perfil de poropressão encontrado na análise de fluxo estacionário foi utilizado como perfil inicial de poropressão para as análises de fluxo transiente.

Para as análises de fluxo transiente utilizou-se a condição de contorno do tipo  $q$  (fluxo através da superfície), com a opção de revisão pela máxima pressão, adicionando-se a precipitação, a chuva inicial utilizada para a equalização dos níveis de sucção do modelo, conforme Tabela 15 abaixo.

Tabela 15 – Chuva 1 - Níveis de precipitação.

Dia	Data	Tempo (s)	Precipitação (mm/dia)	Precipitação (mm/s)	Precipitação + Chuva Inicial (mm/s)
1	28/02/2011	86400	0,00	0,000E+00	4,000E-09
2	01/03/2011	172800	1,26	1,458E-08	1,858E-08
3	02/03/2011	259200	4,54	5,255E-08	5,655E-08
4	03/03/2011	345600	11,89	1,376E-07	1,416E-07
5	04/03/2011	432000	10,12	1,171E-07	1,211E-07
6	05/03/2011	518400	5,04	5,833E-08	6,233E-08
7	06/03/2011	604800	19,26	2,229E-07	2,269E-07
8	07/03/2011	691200	6,58	7,616E-08	8,016E-08
9	08/03/2011	777600	3,03	3,507E-08	3,907E-08
10	09/03/2011	864000	6,08	7,037E-08	7,437E-08
11	10/03/2011	950400	58,84	6,810E-07	6,850E-07
12	11/03/2011	1036800	189,67	2,195E-06	2,199E-06
13	12/03/2011	1123200	39,08	4,523E-07	4,563E-07

Dia	Data	Tempo (s)	Precipitação (mm/dia)	Precipitação (mm/s)	Precipitação + Chuva Inicial (mm/s)
14	13/03/2011	1209600	0,75	8,681E-09	1,268E-08
15	14/03/2011	1296000	4,81	5,567E-08	5,967E-08
16	15/03/2011	1382400	0,75	8,681E-09	1,268E-08
17	16/03/2011	1468800	0,00	0,000E+00	4,000E-09
18	17/03/2011	1555200	0,75	8,681E-09	1,268E-08
19	18/03/2011	1641600	0,00	0,000E+00	4,000E-09
20	19/03/2011	1728000	0,00	0,000E+00	4,000E-09

### Parâmetros hidráulicos

As curvas de retenção e de permeabilidade não saturada dos materiais determinam o comportamento da água no interior do solo, alimentando as formulações empíricas propostas por Van Genuchten (1980) e assim determinando o comportamento hidráulico do solo.

Na presente pesquisa foram avaliadas apenas as propriedades hidráulicas da camada superficial de solo, ou seja, colúvio. Devido a profundidade de amostragem não foi possível determinar os parâmetros do solo residual / migmatito.

Para as análises de fluxo optou-se em trabalhar com parâmetros hidráulicos constantes, ou seja, os mesmos valores de permeabilidade saturada e curva de retenção de umidade, para todos os materiais (Material 1, 2 e 3).

Selecionou-se como o material representativo da região a amostra A3, devido à sua localização de amostragem e às características táteis-visuais condizentes com a região.

Nas Figuras 47 e 48 estão representadas respectivamente a curva de retenção, ajustada pelo método de Fredlund e Xing (1994), e a curva de permeabilidade não saturada da amostra A3, ajustada pelo modelo de Van Genuchten (1980).

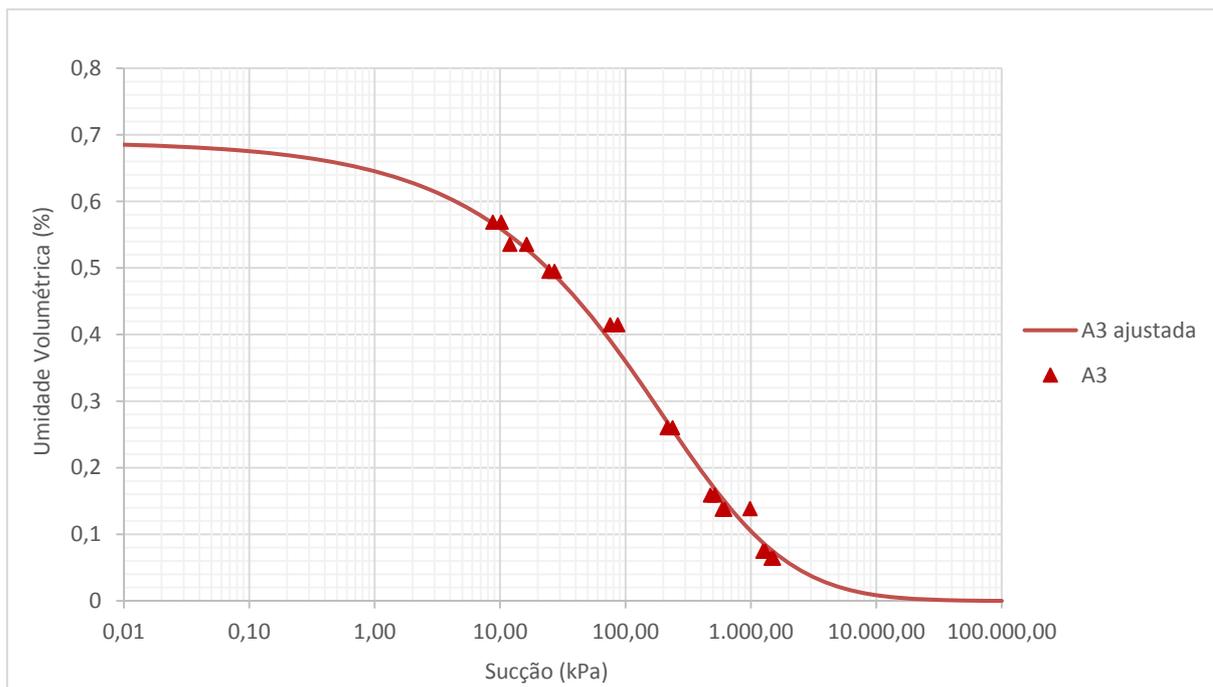


Figura 47 – Curva de retenção A3 ajustada pelo método Fredlund e Xing (1994).

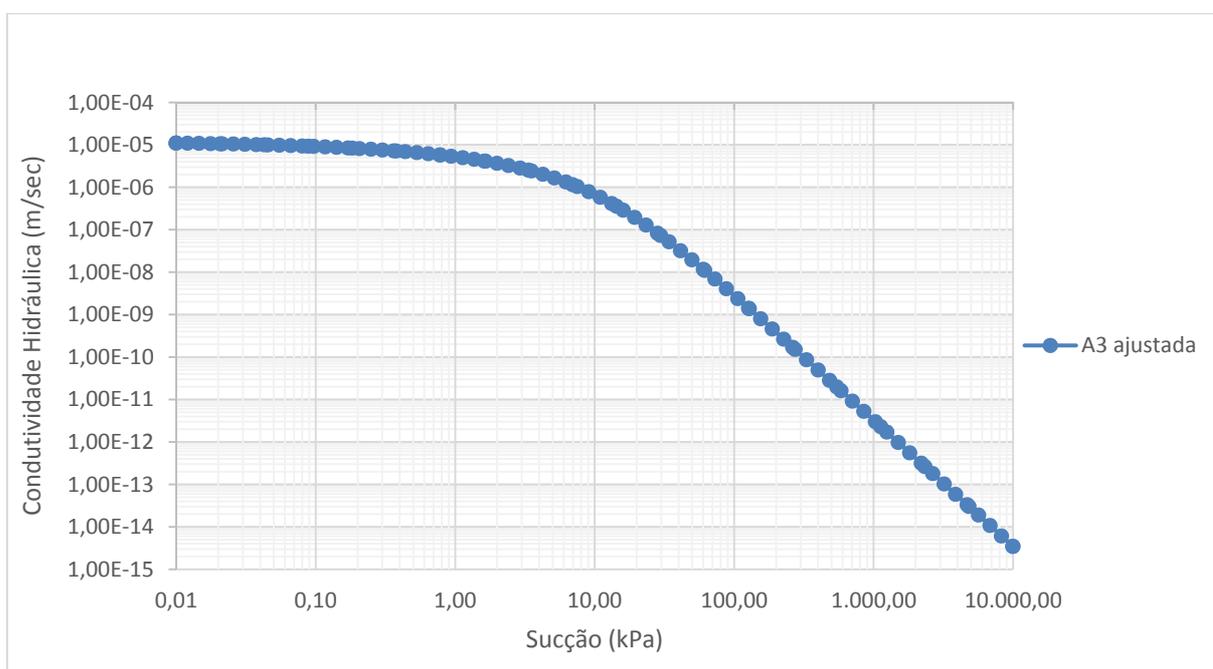


Figura 48 – Curva de permeabilidade não saturada A3 ajustada pelo método Van Genuchten (1980).

Determinadas as condições de contorno iniciais, avaliou-se o comportamento da poropressão em diferentes níveis de pluviometria, assim como a variação do fator

de segurança para os diferentes cenários, buscando compreender o processo de infiltração em solos não saturados.

#### 4.6 HIPÓTESES DE ESTABILIDADE

Para a análise de estabilidade da encosta utilizou-se o método proposto por Spencer (1967). Segundo Tonus (2009), o método de Spencer satisfaz todas as condições de equilíbrio estático e assume que as forças entre as fatias são paralelas entre si, ou seja, todas são inclinadas de um mesmo ângulo, sendo o mesmo calculado juntamente com a solução do problema.

#### 4.7 CENÁRIOS

Serão analisados 4 (quatro) cenários distintos, os quais serão descritos no decorrer deste capítulo.

Nos Cenários 1 e 2 serão avaliadas a estabilidade real da encosta sem a consideração de fluxo, ou seja, sem a percolação de água. Nos Cenários 3 e 4 serão avaliadas primeiramente as condições de fluxo e posteriormente a estabilidade.

As análises de fluxo foram realizadas através do método dos elementos finitos e as análises de estabilidade seguiram a teoria do equilíbrio limite. Na Figura 49 estão apresentadas, em ordem crescente de refinamento, as principais características dos diferentes cenários analisados.

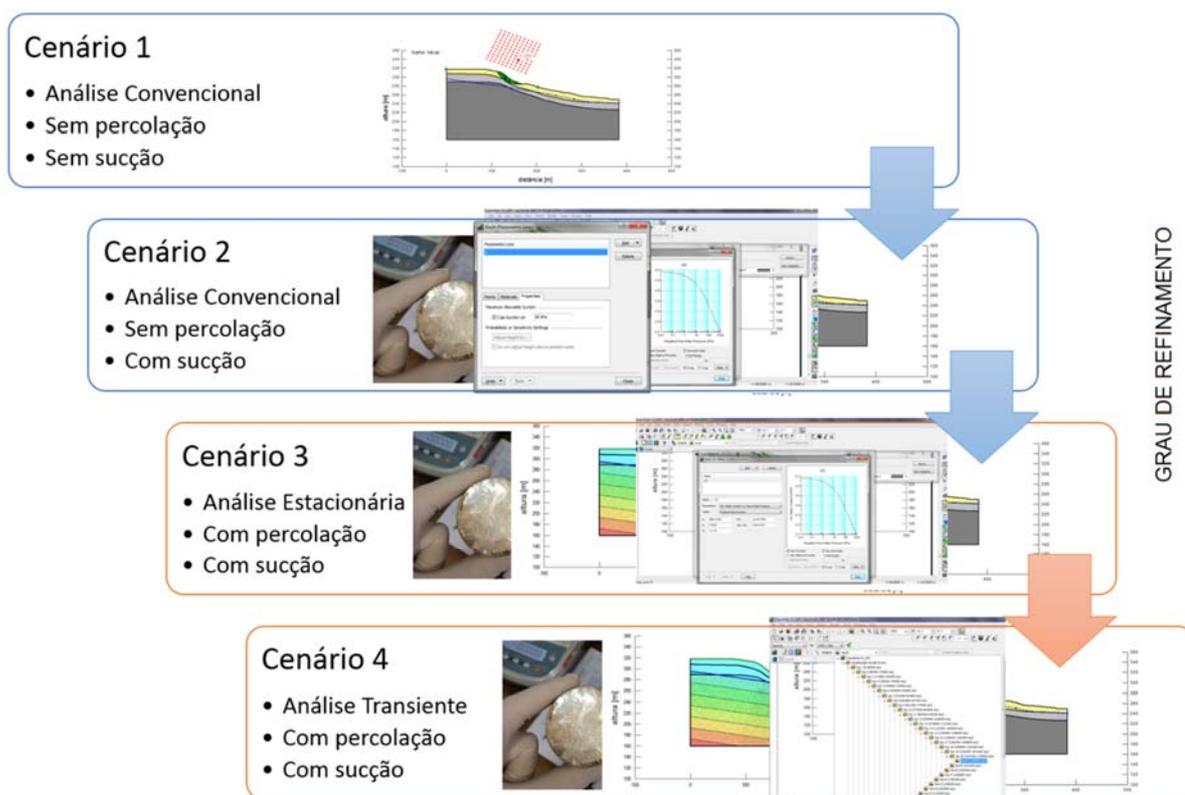


Figura 49 – Cenários analisados.

#### 4.7.1 Cenário 1

O Cenário 1 representa a condição de menor grau de refinamento. Para o desenvolvimento das análises de estabilidade foram necessários dados básicos sobre a encosta, como: dados topográficos, dados de caracterização e resistência dos materiais envolvidos e informações sobre a posição do nível de água.

No Cenário 1 foi avaliada a estabilidade real da encosta, sem a consideração de fluxo, ou seja, sem a percolação de água pelo maciço. Considerou-se apenas como condição inicial de pressão a freática média registrada pelos piezômetros. Nesta simulação não foram inseridas as características hidráulicas dos materiais, como a curva de retenção e a curva de condutividade hidráulica.

Neste cenário abaixo do nível de água o diagrama de pressão é dado pelo produto da altura ( $h_w$ ) pelo peso específico da água ( $\gamma_w$ ), pressão positiva. Acima do

nível de água, esta pressão foi considerada nula, ou seja, desprezou-se a parcela equivalente a sucção mátrica do material.

#### 4.7.2 Cenário 2

No Cenário 2 também foi avaliada a estabilidade real da encosta sem percolação, porém considerou-se as propriedades hidráulicas dos materiais, ou seja, a sucção mátrica do solo.

Para este cenário foram necessários além dos dados já descritos no Cenário 1, os parâmetros hidráulicos do solo, como a curva de retenção e a curva de condutividade hidráulica. Portanto ensaios de laboratório e de campo foram necessários para a elaboração do modelo.

De forma a impedir o diagrama triangular de pressão acima do nível de água, os níveis de sucção foram limitados em 80 kPa.

#### 4.7.3 Cenário 3

No Cenário 3 avaliou-se a estabilidade da encosta através de uma análise de fluxo estacionário, *steady-state*, avaliando a influência da percolação na estabilidade global da encosta. Nesta análise não foram consideradas a influência de precipitações anteriores ou condições de fluxo iniciais ao modelo.

No Cenário 3 o grau de refinamento das análises é maior. Pois além da análise de estabilidade foram necessários a elaboração de modelos matemáticos em elementos finitos para a definição da distribuição de poropressão no interior do maciço, o que tornam as análises mais criteriosas e morosas.

De forma a impedir o diagrama triangular de pressão os níveis de sucção foram limitados em 80 kPa, para isso utilizou-se o artifício descrito no item 4.5.

Na análise do tipo estacionária, não foi considerado o tempo necessário para se atingir o cenário apresentado, ou seja, são as condições de contorno que definem

o perfil de pressão inicial e o fluxo no material. Para esta situação o perfil de pressão foi definido através dos dados piezométricos.

#### 4.7.4 Cenário 4

Finalmente, no Cenário 4, será apresentada a estabilidade para diferentes níveis de precipitação e tempos de duração, ou seja, análise de fluxo transiente.

O Cenário 4 representa o grau máximo de refinamento, onde foram avaliadas as condições de fluxo e estabilidade para os 20 dias da chuva de projeto. De forma a impedir o diagrama triangular de pressão acima do nível de água, os níveis de sucção foram limitados em 80 kPa, conforme artifício descrito no item 4.5.

### 4.8 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

As análises de fluxo foram realizadas utilizando-se o programa Seep/W (GeoStudio, 2007) enquanto as análises de estabilidade foram conduzidas utilizando-se o programa Slope/W (GEO-STUDIO, 2007).

#### 4.8.1 Programa *Seep/W*

O Seep/W é um *software* do pacote GeoStudio 2007, o qual permite através do método dos elementos finitos – MEF, a modelagem e a análise numérica do fluxo de água subterrâneo e a distribuição das poropressões em meios porosos, tanto em solo como em rocha, podendo ser utilizado para modelar fluxo saturado e não saturado.

O Seep/W é uma ferramenta matemática extremamente potente, a qual permite a solução numérica da Equação de *Richards*, que será utilizada como modelo na determinação do comportamento da condutividade hidráulica do solo, conforme apresentado no item 2.2.5. Portanto através do Seep/W é possível realizar desde

análises simples de fluxo em regime permanente até as mais complexas análises em regime transiente.

#### 4.8.2 Programa *Slope/W*

O *Slope/W*, também pertencente ao pacote GeoStudio 2007, é um dos *softwares* mais utilizados no meio geotécnico, o qual permite calcular o fator de segurança de taludes e encostas em rocha e em solo (FARIAS, 2013).

Usando-se o método do equilíbrio limite, o *software* permite a modelagem de geometrias complexas, podendo avaliar diferentes superfícies de deslizamento e condições de poropressão.

Para a análise de estabilidade do talude sujeito a infiltração, o *software* permite importar o perfil de pressões de água atuantes no talude, avaliando a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento do solo, assim como a variação do fator de segurança do talude.

## CAPÍTULO 5 - RESULTADOS

### 5.1 PERFIS DE PRESSÃO DA ÁGUA DURANTE A INFILTRAÇÃO

Antes da apresentação dos resultados das análises de fluxo e estabilidade, vale a pena descrever a evolução da poropressão durante o processo de infiltração, possibilitando a compreensão da variação do Fator de Segurança da encosta submetida à precipitação.

Segundo Zhang *et al.* (2004) o desenvolvimento do perfil de poropressão para diferentes níveis de precipitação é exemplificado através da Figura 50 abaixo, onde:

- a) Intensidade pluviométrica menor que o coeficiente de permeabilidade saturado do solo

Nesta situação, não existe água para a formação da frente de saturação do material, apenas uma frente úmida que eleva a umidade do solo para um valor final, onde a condutividade hidráulica do material atinge a velocidade de infiltração. Conforme mostra a Figura 50a, neste caso a parcela de sucção não se anula.

- b) Intensidade pluviométrica maior que o coeficiente de permeabilidade saturado do solo

Neste caso, o excesso de precipitação na superfície da encosta leva à formação de uma frente de saturação, elevando a umidade do solo até a máxima umidade possível de ser atingida por percolação.

Assim a sucção irá se anular na superfície do terreno e a diferença entre a quantidade de água da precipitação menos a capacidade de infiltração do solo irá escoar superficialmente (Figura 50b).

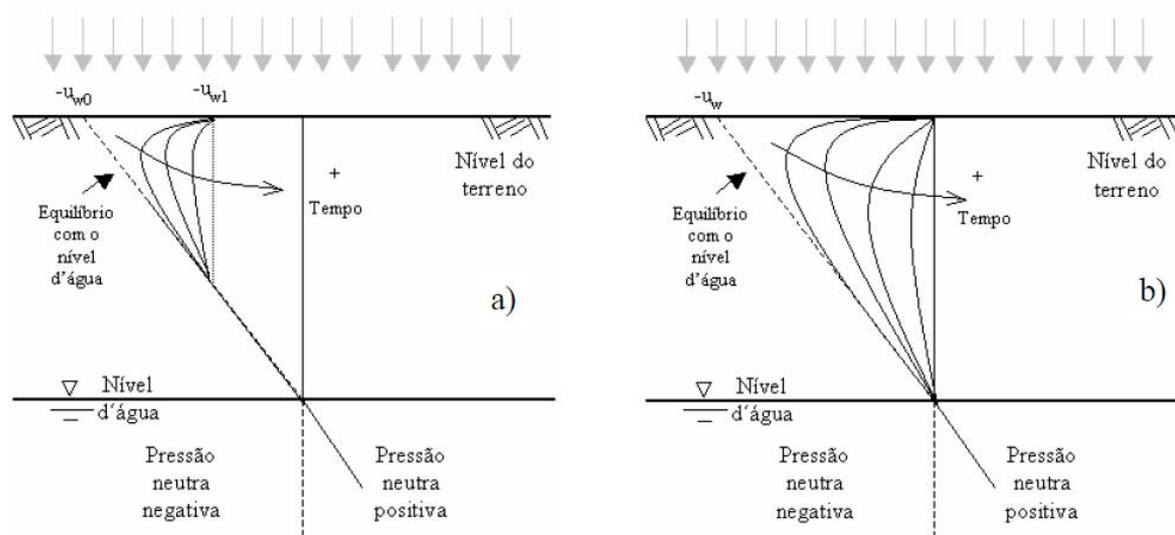
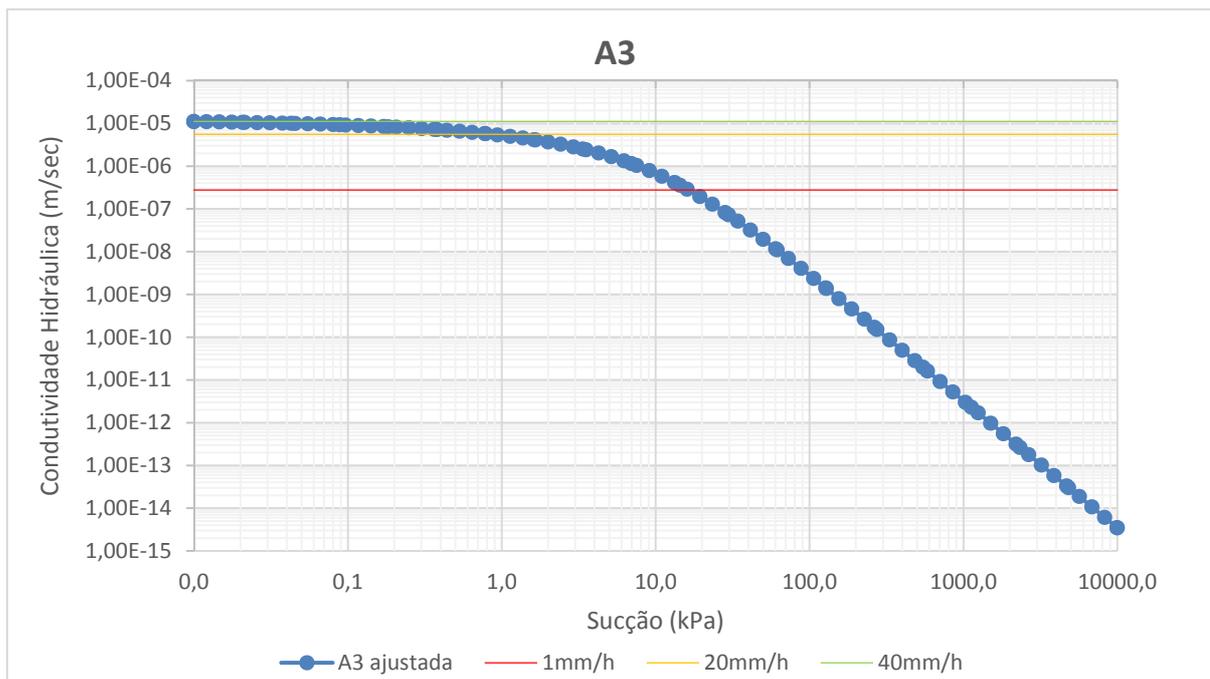


Figura 50 – Perfis de sucção durante o processo de infiltração. Fonte: Zhang *et al.* (2004).

De forma a avaliar o processo de infiltração descrito acima e entender o processo de escoamento superficial, simulou-se chuvas com intensidades inferiores e superiores ao coeficiente de condutividade hidráulica do material superficial.

A encosta foi submetida a intensidades de precipitação de 1, 20 e 40 mm/h. A precipitação de 40 mm/h excede a máxima capacidade de infiltração do solo, que é de  $1,10 \times 10^{-5}$  m/s (36 mm/h), configurando uma condição de precipitação excedente, ou seja onde ocorreria um escoamento superficial.

Abaixo, na Figura 51 é apresentada a curva de condutividade hidráulica característica da encosta, assim como as chuvas para a simulação da infiltração e do escoamento superficial.

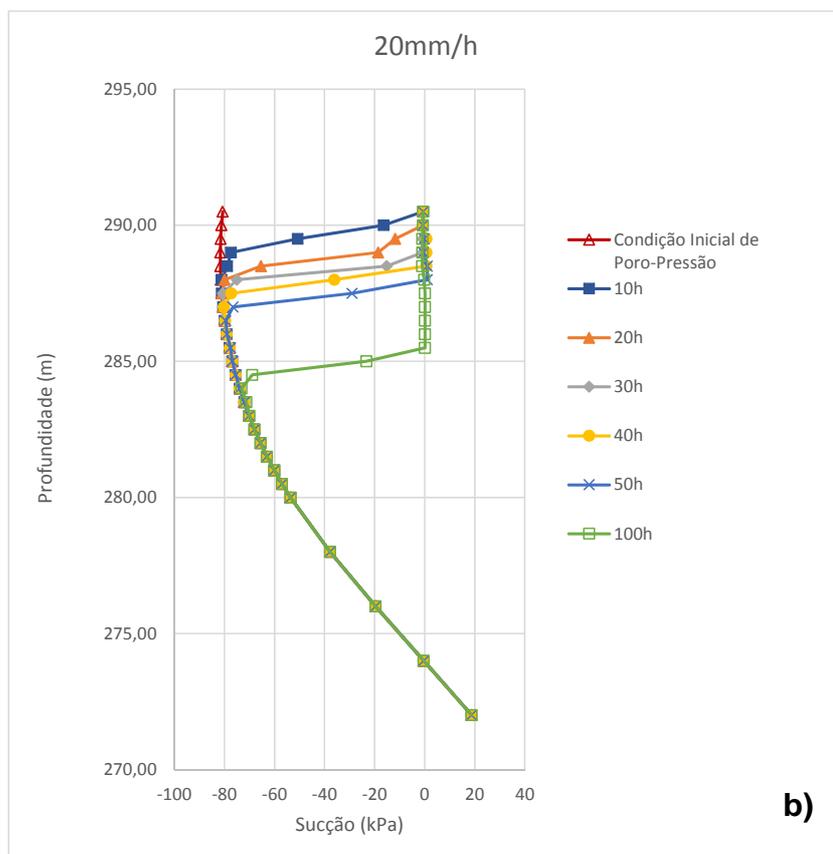
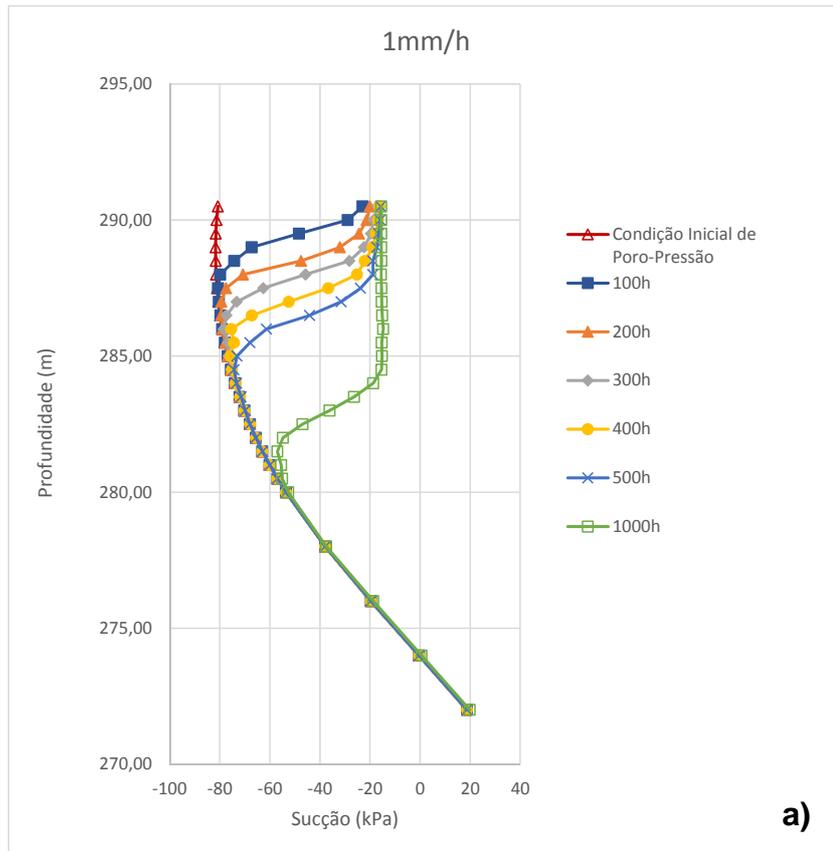


**Figura 51 – Condutividade hidráulica do solo e precipitações analisadas.**

Na sequência serão apresentados os perfis de sucção para os diferentes níveis de precipitação e duração. Serão apresentados apenas os perfis de sucção obtidos através da Seção 1 de pressão.

Os tempos de duração das chuvas foram determinados através de diversas análises de infiltração, buscando os intervalos de tempo mais representativos para tipo de solo e intensidade de precipitação.

Na Figura 52 apresenta-se os perfis de sucção para chuvas de 1, 20 e 40 mm/h, com tempos de duração variáveis. Para as chuvas de maiores intensidades (20 e 40 mm/h), o tempo de duração foi de 10, 20, 30, 40, 50 e 100 horas. Para a chuva de menor intensidade, ou seja 1mm/h, foi-se necessário expandir os tempos de precipitação para 100, 200, 300, 400, 500 e 1000 horas, fato este, devido ao baixo nível de precipitação e a baixa permeabilidade do material argiloso que constitui as camadas superficiais da encosta.



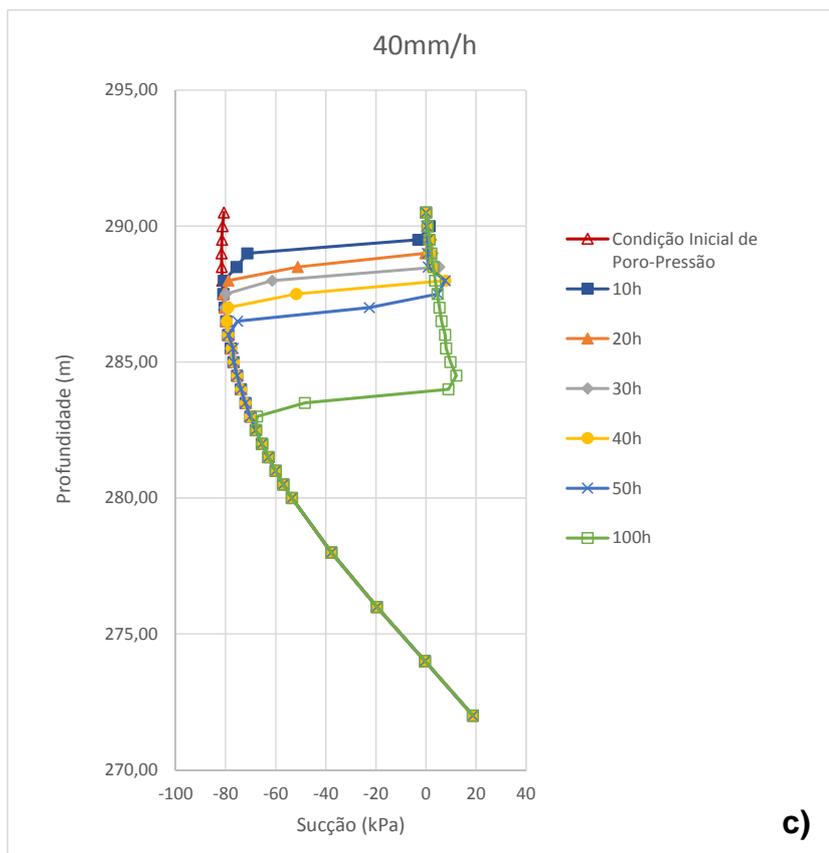


Figura 52 – Perfil de poropressão ao longo do tempo,  $K_s=1,10e-5$  m/s, precipitação de 1, 20 e 40 mm/h.

A partir da Figura 51 é possível verificar que para as taxas de infiltração de 1, 20 e 40 mm/h, a sucção é de 20, 1,0 e 0,5 kPa, respectivamente. Estes valores podem ser verificados também através da curva de na Figura 52 assim como é possível confirmar o desenvolvimento das poropressões descritas por Zhang *et al.* (2004).

Verifica-se na Figura 52 que, partindo da sucção inicial (80 kPa), ocorre uma tendência de uniformização dos níveis de sucção ao longo da profundidade nos valores correspondentes às taxas de infiltração aplicadas ao material. Esta situação é alterada após um tempo maior de precipitação, onde se inicia a ascensão da linha freática.

A ascensão da linha freática tende a ocorrer se a duração da precipitação for prolongada o suficiente para que isso se materialize. Na Figura 53 é apresentado a evolução do perfil de sucção do solo A3 para a precipitação de 1 mm/h, onde é possível perceber este fenômeno. Simulou-se chuvas com durações de até 3000 h, ou seja, 125 dias.

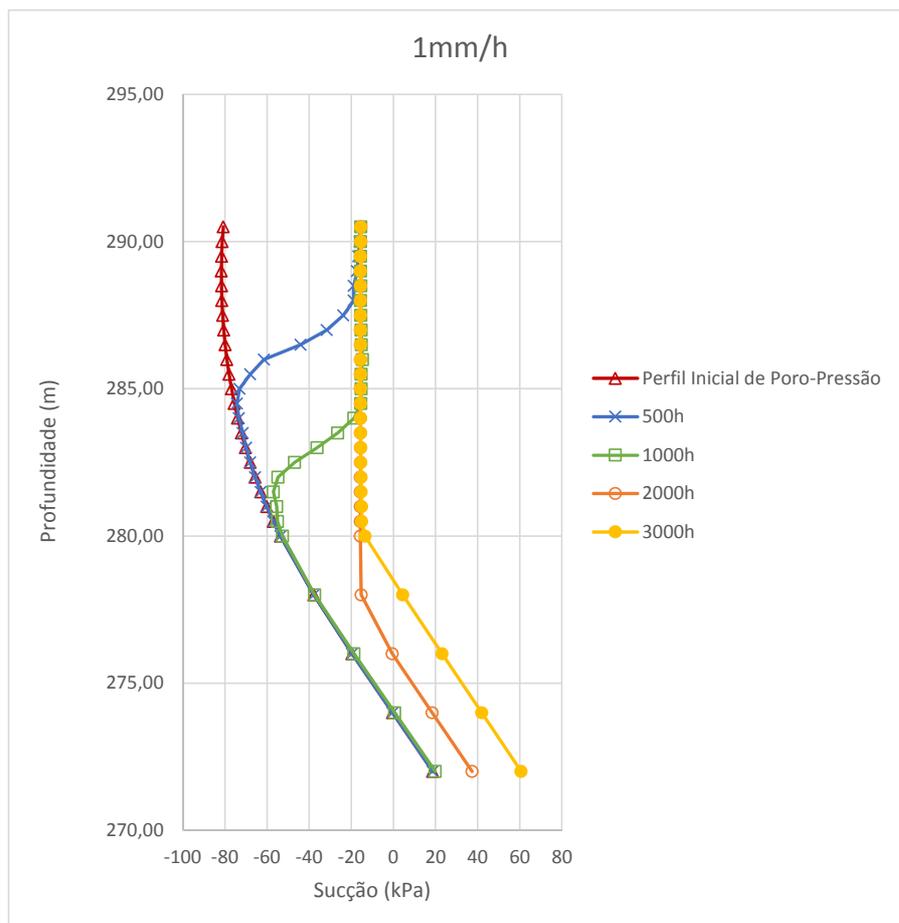


Figura 53 – Perfil de poropressão ao longo do tempo,  $K_s=1,10e^{-5}$  m/s, precipitação de 1 mm/h, duração de até 3000 h, ou 125 dias.

Conforme descrito anteriormente, para a precipitação de 1 mm/h ou  $2,78e^{-7}$  m/s (valor abaixo da condutividade hidráulica do material) não ocorre a saturação das camadas superficiais da encosta. A frente de umedecimento, ou saturação do material, não é bem definida, ou seja, apresenta comportamento não uniforme em função da profundidade. Para esta intensidade de precipitação os níveis de sucção foram estabilizados em 20 kPa.

Para a precipitação de 20 mm/h, ou  $5,56e^{-6}$  m/s, valor próximo à condutividade hidráulica do material, os níveis de sucção já estão bem próximos a zero, porém ainda não ocorre a saturação superficial do terreno. Observa-se que a frente de umedecimento é bem definida, ou seja, uniforme.

Para a precipitação de 40 mm/h, ou  $1,11e^{-5}$  m/s, valor acima da condutividade hidráulica do material, observa-se a saturação das camadas superficiais do solo e o

início do processo de escoamento superficial. A frente de umedecimento é bem definida, ou seja, todo o maciço percorrido pela frente encontra-se totalmente ou quase totalmente saturado. A velocidade da frente de saturação registrada neste caso é pequena, somente após 50 h de precipitação esta frente atingirá cerca de 2 m de profundidade.

Caso não ocorra saída de água do sistema, ocorre a elevação do nível freático até que o perfil de pressão de água atuante esteja em equilíbrio hidrostático com a sucção do solo na superfície.

Na Figura 53 é possível observar a elevação do nível de água a partir de 1000 h de precipitação, onde o nível de água se eleva 2 m em um intervalo de 1000 h, ou seja 40 dias. O baixo valor encontrado é decorrente da baixa taxa de precipitação aplicada ao modelo. Após a este estágio, com o prosseguimento da precipitação, ocorrerá a redução da sucção em superfície até que seja atingida a completa saturação da superfície.

Verificado o processo de infiltração e o procedimento de escoamento superficial, na sequência serão apresentadas as análises descritas no item 4.7 do presente trabalho.

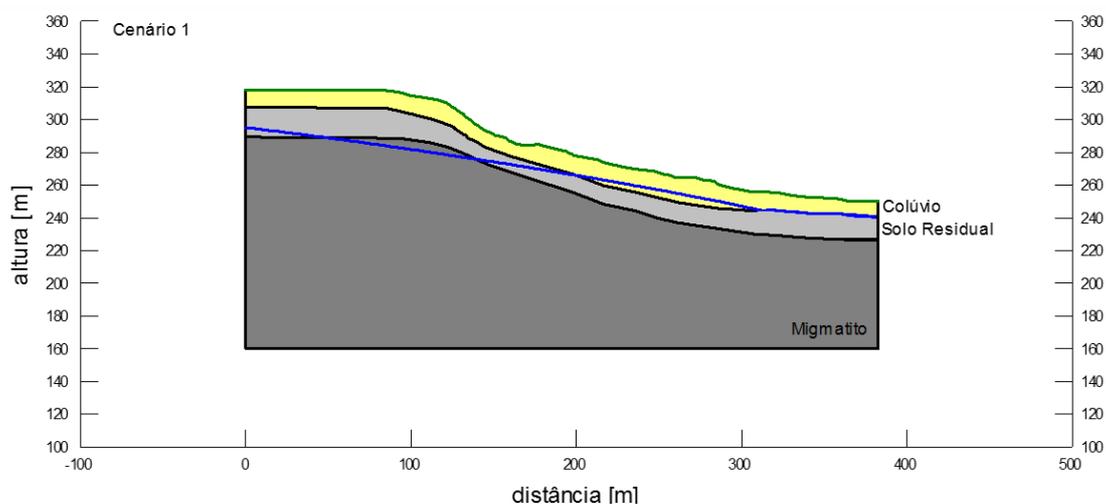
## 5.2 CENÁRIO 1

No cenário 1 avaliou-se a estabilidade da região superior e inferior da encosta sem a consideração de fluxo, ou seja, sem a percolação de água pelo maciço. Como condição inicial de pressão considerou-se a freática média registrada pelos piezômetros instalados na encosta.

Nesta simulação não foram inseridas as características hidráulicas dos materiais, como a curva de retenção e a curva de condutividade hidráulica. Acima do nível de água, esta pressão foi considerada nula, ou seja, desprezou-se a parcela equivalente a sucção mátrica do material.

Utilizou-se para a análise o método proposto por *Spencer*, através da teoria do equilíbrio limite. Na Figura 54 é representada a seção de análise, onde é possível

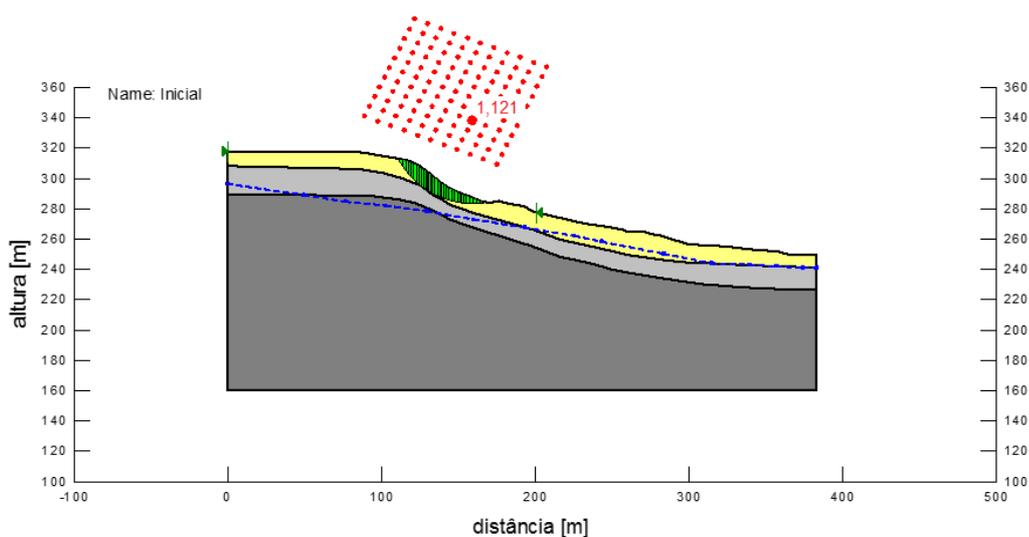
verificar a os contatos entre os diferentes tipos de solo e a posição da linha freática inferida.



**Figura 54 – Seção de análise importada para o Slope/W.**

A estabilidade da região inferior da encosta foi verificada em ambos os cenários analisados. A preocupação decorre devido à localização do duto, o qual encontra-se implantado na porção inferior da encosta.

Para as condições descritas acima, as análises de estabilidade apresentaram fatores de segurança de 1,12 para a região superior da encosta e de 2,36 para a região inferior, conforme apresentam as Figuras 55 e 56.



**Figura 55 – Cenário 1, região superior.**

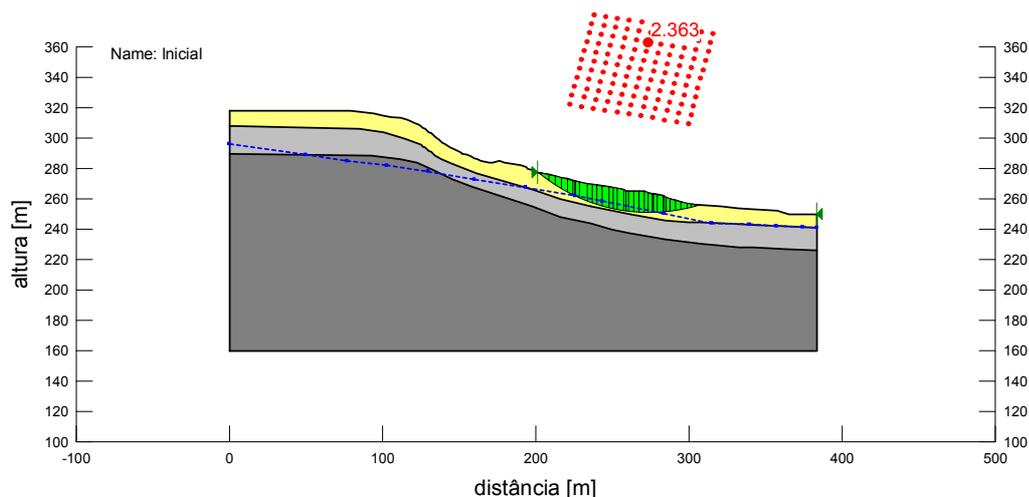


Figura 56 – Cenário 1, região inferior.

### 5.3 CENÁRIO 2

O Cenário 2 admitiu as mesmas premissas adotadas no Cenário 1, porém considerou-se a parcela equivalente a sucção mátrica do material nas análises de estabilidade.

Utilizou-se para a análise o método proposto por *Spencer*, através da teoria do equilíbrio limite. Para as condições descritas acima, as análises de estabilidade apresentaram fatores de segurança de 1,37 para a região superior da encosta e de 2,51 para a região inferior, conforme apresentam as Figuras 57 e 58.

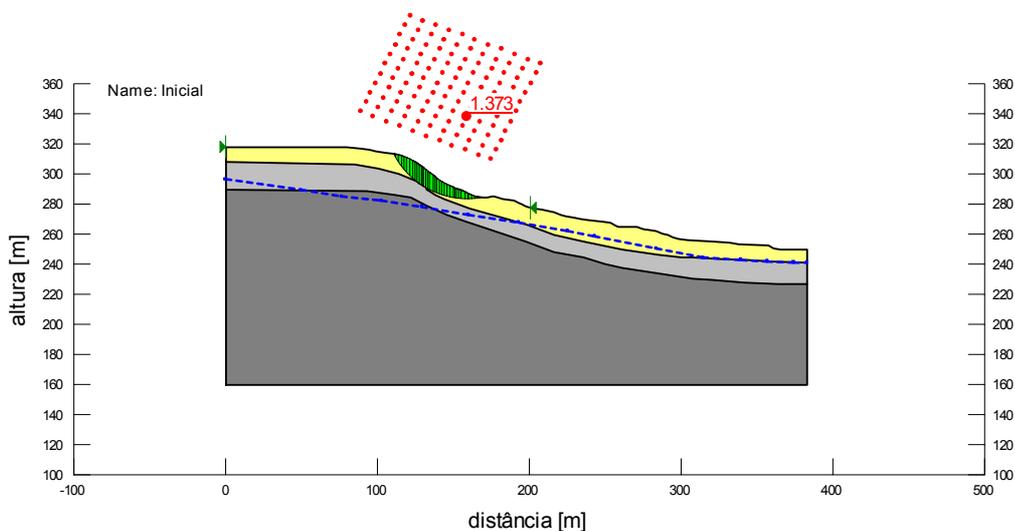


Figura 57 – Cenário 2, região superior.

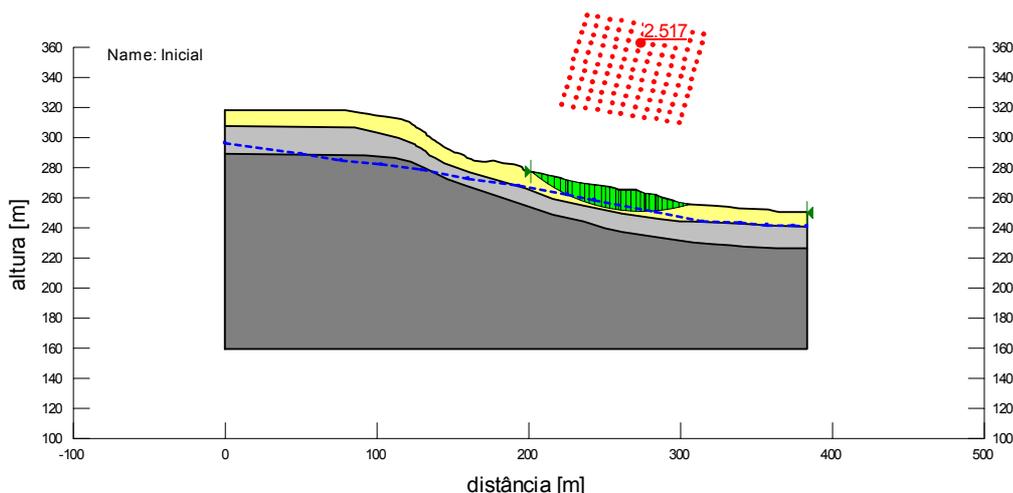


Figura 58 – Cenário 2, região inferior.

Percebe-se que a consideração da sucção matricial leva a uma maior resistência ao cisalhamento, fato que pode ser verificado através da variação dos fatores de segurança apresentados nos Cenários 1 e 2.

Para a região superior da encosta, o fator de segurança que antes era de 1,12, passou a 1,37, apenas com a consideração da poropressão. Este aumento representa um acréscimo de 22% no fator de segurança da encosta.

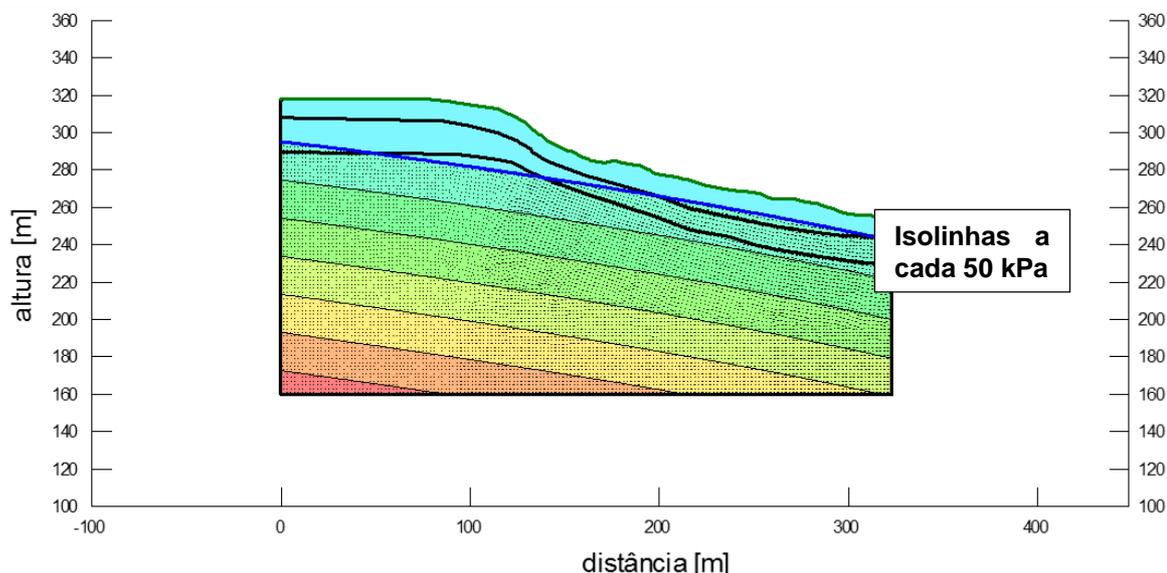
Para a região inferior o comportamento registrado foi semelhante. O fator de segurança que antes era de 2,36 passou a ser 2,51, ou seja, registrando um acréscimo de 6%.

#### 5.4 CENÁRIO 3

No Cenário 3 avaliou-se a estabilidade da encosta através de uma análise de fluxo estacionário, *steady-state*, avaliando a influência da percolação na estabilidade global da encosta.

Nesta análise não considerou-se o tempo necessário para se atingir o cenário atual apresentado, ou seja, as condições de contorno do modelo defiram as condições iniciais de pressão e fluxo.

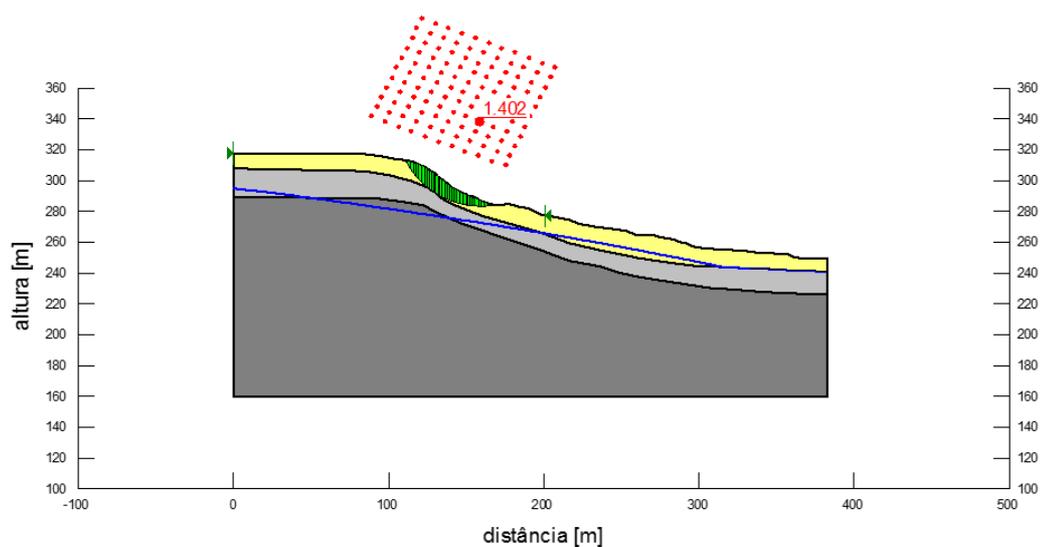
Na Figura 59 é apresentada a distribuição de poropressão na seção de análise, obtida através da análise de fluxo. Nesta análise foi necessário controlar os níveis de sucção na superfície do terreno natural, conforme descrito anteriormente.



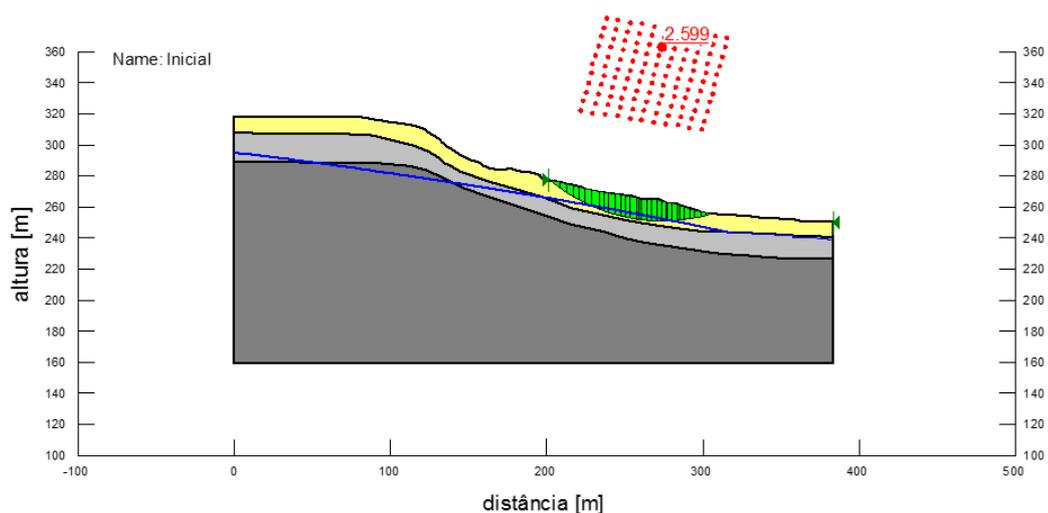
**Figura 59 – Distribuição das poropressões e fluxo.**

Após a análise de fluxo através do *software* Seep/W, a análise de estabilidade foi realizada utilizando-se o Slope/W. Este programa permite importar o perfil de pressões obtido na análise de fluxo realizado no Seep/W.

Considerando todas as condições descritas nos parágrafos acima, obteve-se para a região superior da encosta um fator de segurança de 1,40 e de 2,59 para a região inferior, conforme apresentam as Figuras 60 e 61 respectivamente.



**Figura 60 – Cenário 3, região superior.**



**Figura 61 – Cenário 3, região inferior.**

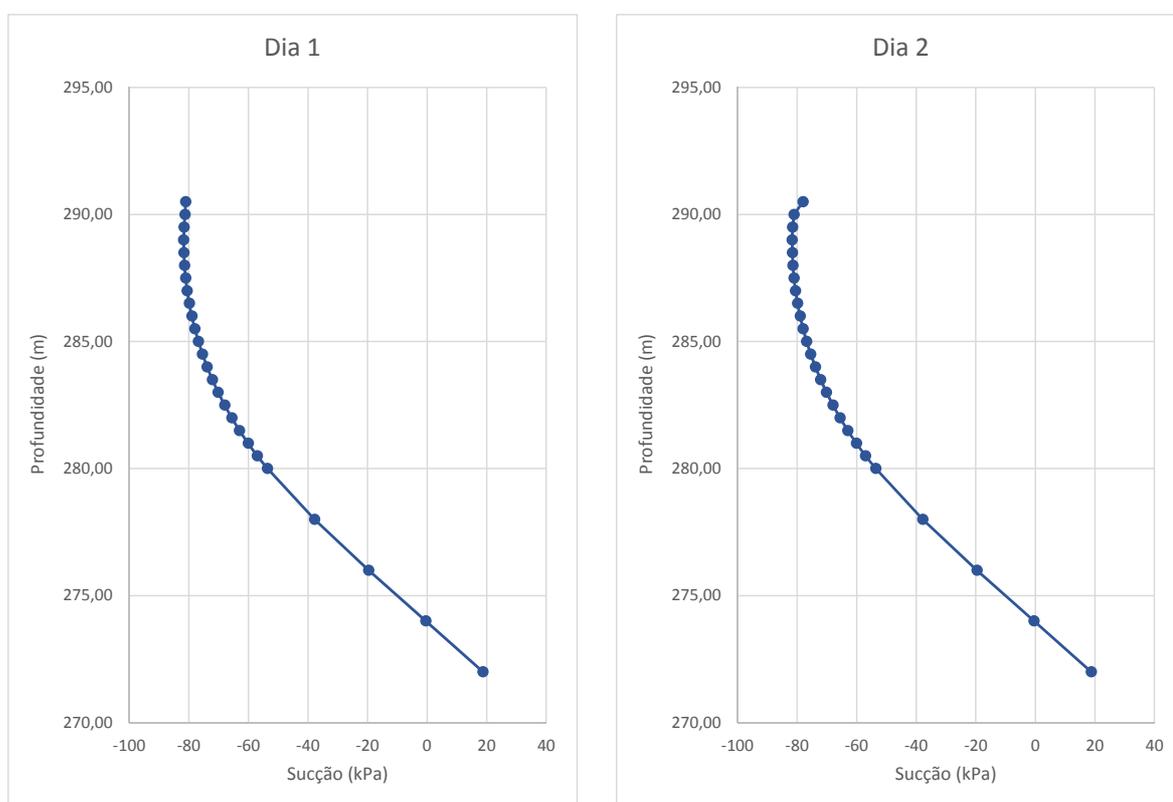
A diferença entre os fatores de segurança observados nos Cenários 2 e 3 decorre exclusivamente da consideração do fluxo na análise de estabilidade da encosta. Esta mesma situação foi verificada nos estudos desenvolvidos por Yomura (2008).

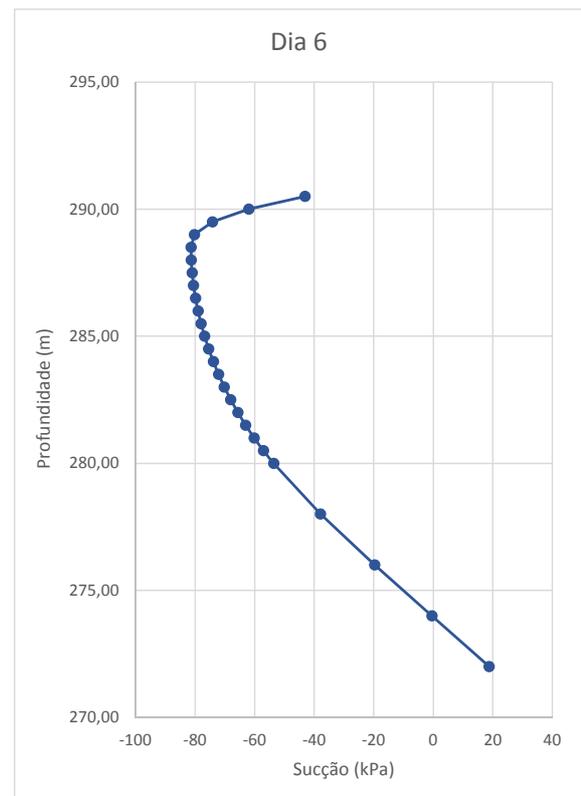
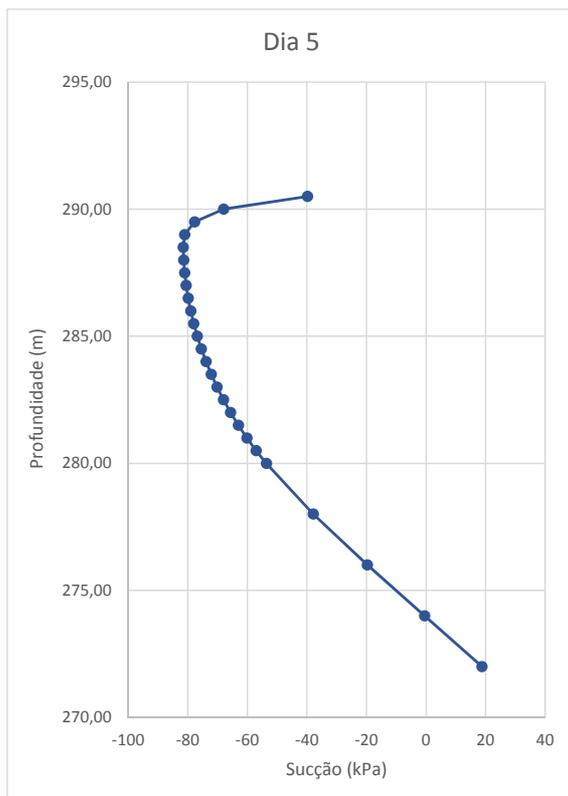
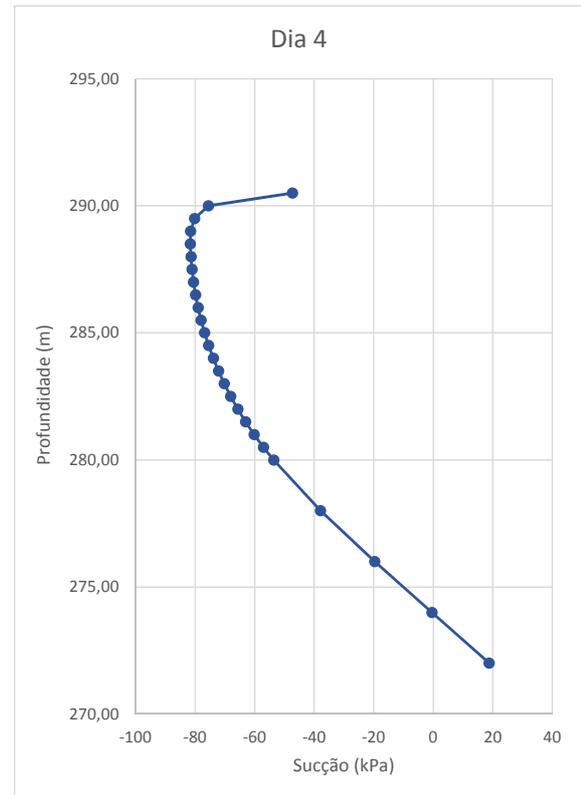
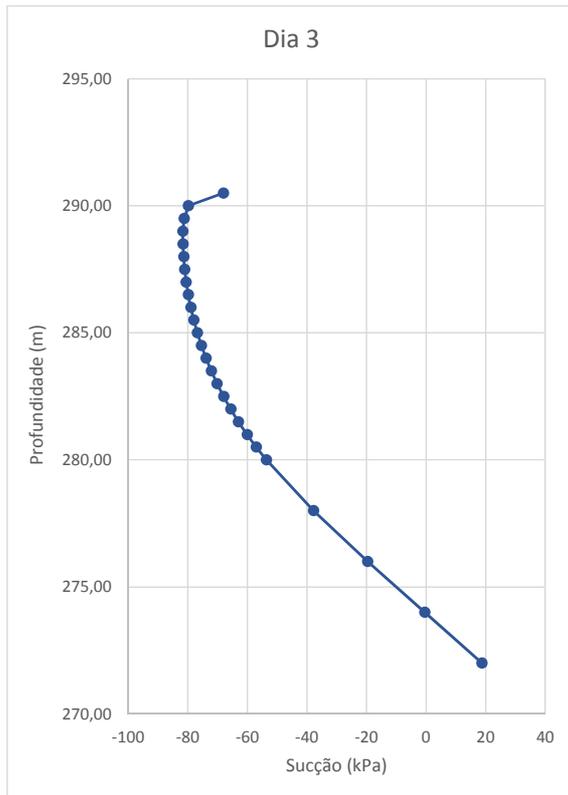
## 5.5 CENÁRIO 4

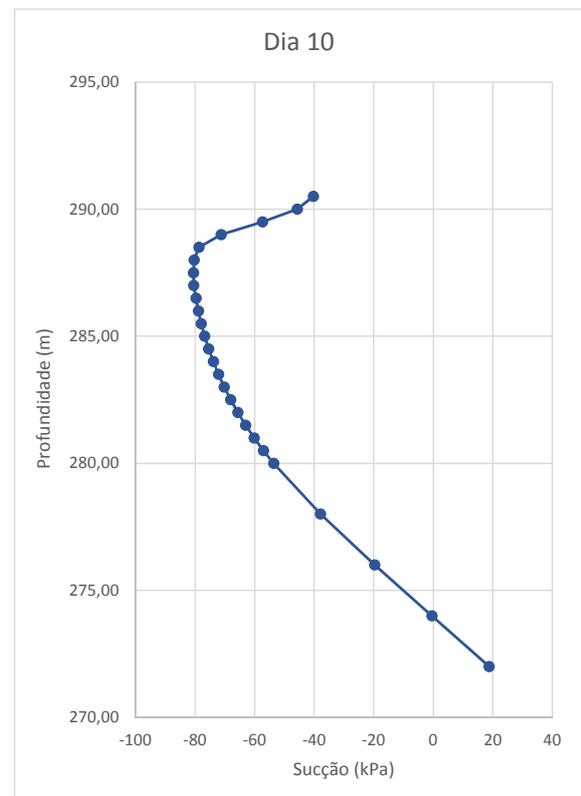
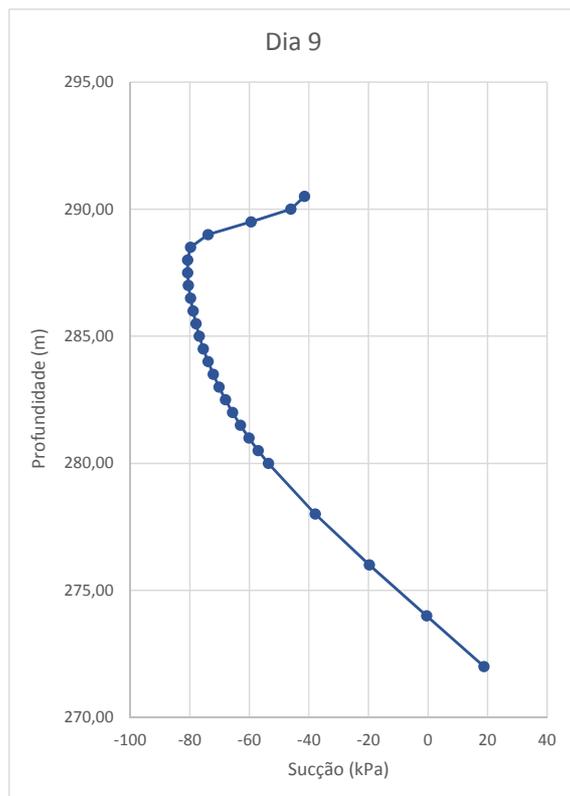
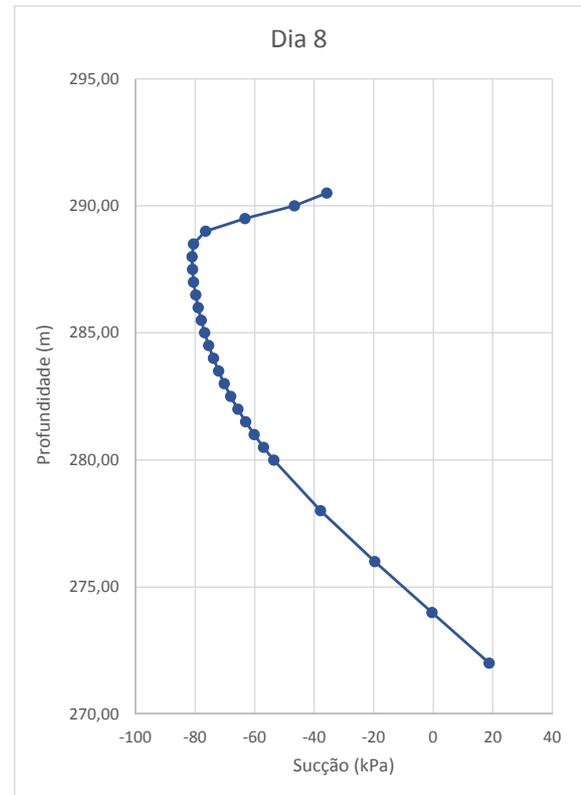
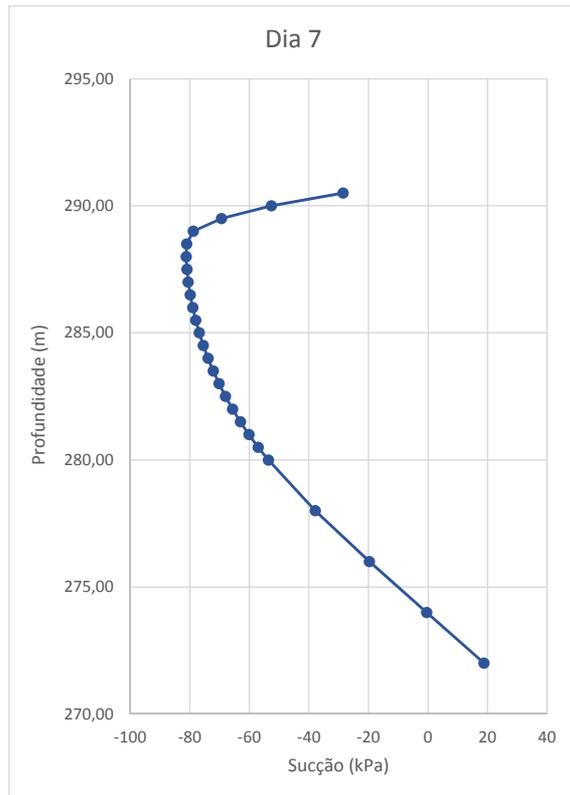
No Cenário 4 avaliou-se estabilidade da encosta para diferentes níveis de precipitação e tempos de duração, ou seja, análise de fluxo transiente. A precipitação diária aplicada ao modelo e as condições iniciais de poropressão foram anteriormente descritas nos itens 4.2 e 4.5, respectivamente.

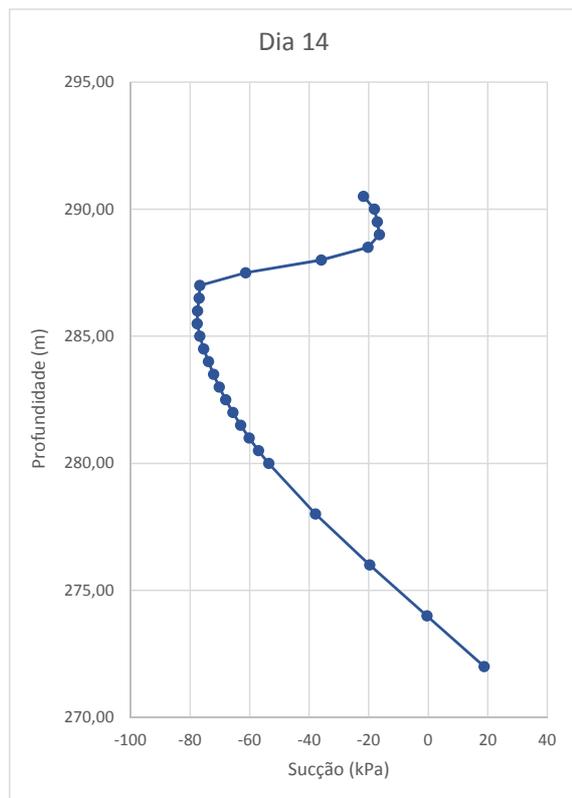
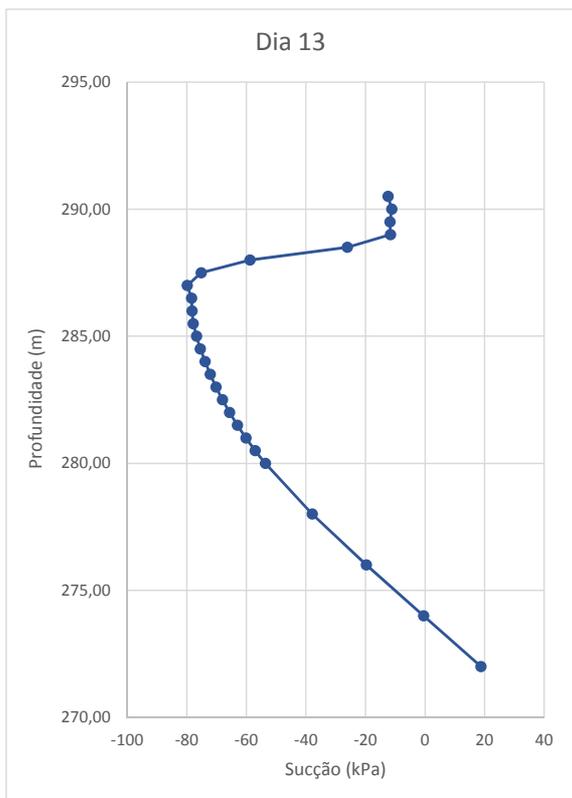
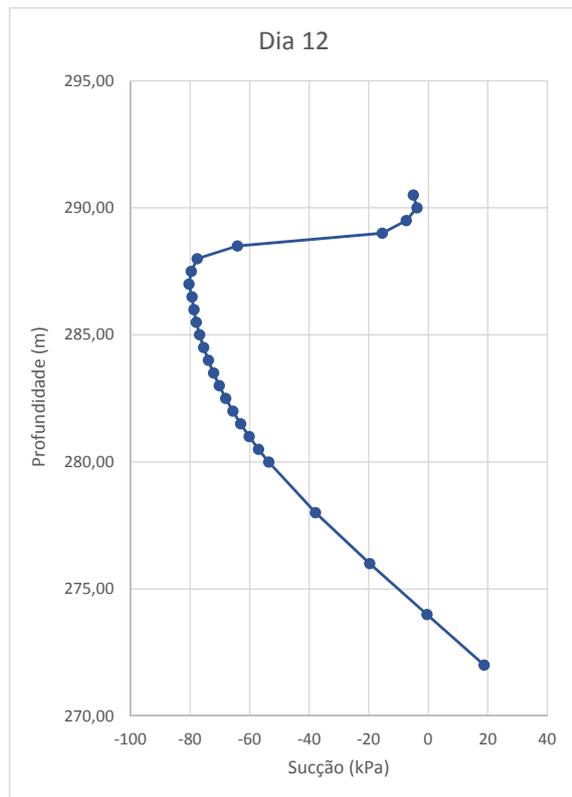
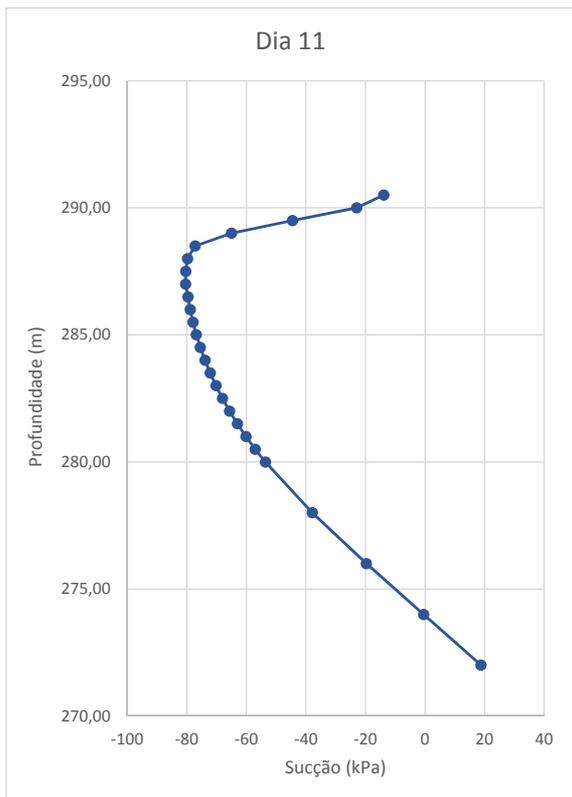
Determinadas as condições de contorno iniciais, aplicou-se em toda a superfície do talude as precipitações registradas entre os dias 28/02/2011 a 19/03/2011, com o objetivo de avaliar o comportamento da poropressão ao longo dos 20 dias (Figura 62) e assim avaliar a sua influência na estabilidade global da encosta.

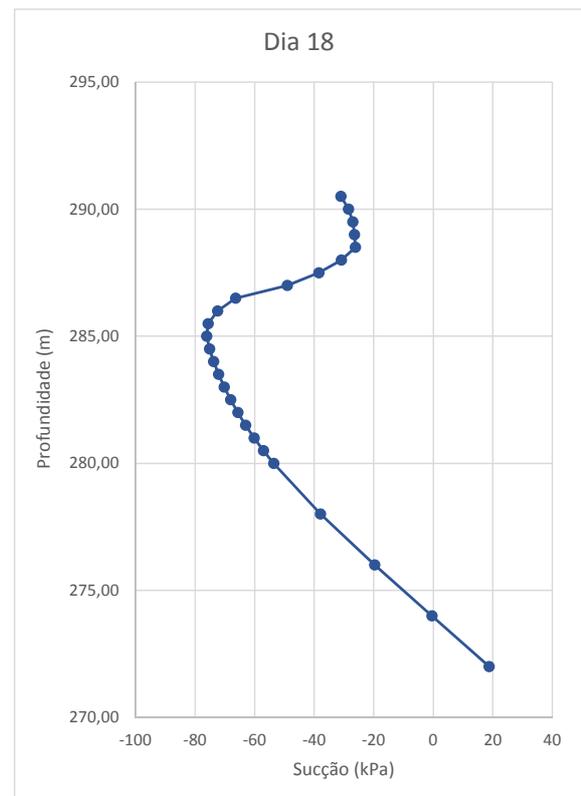
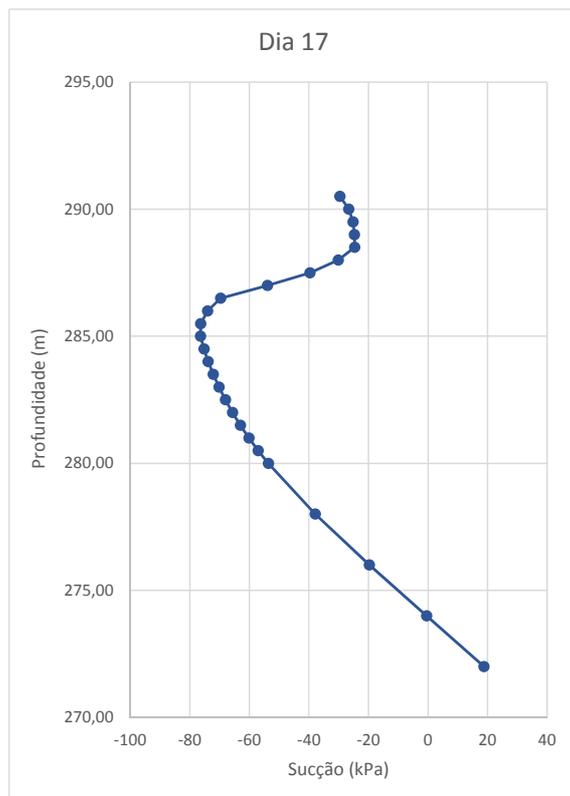
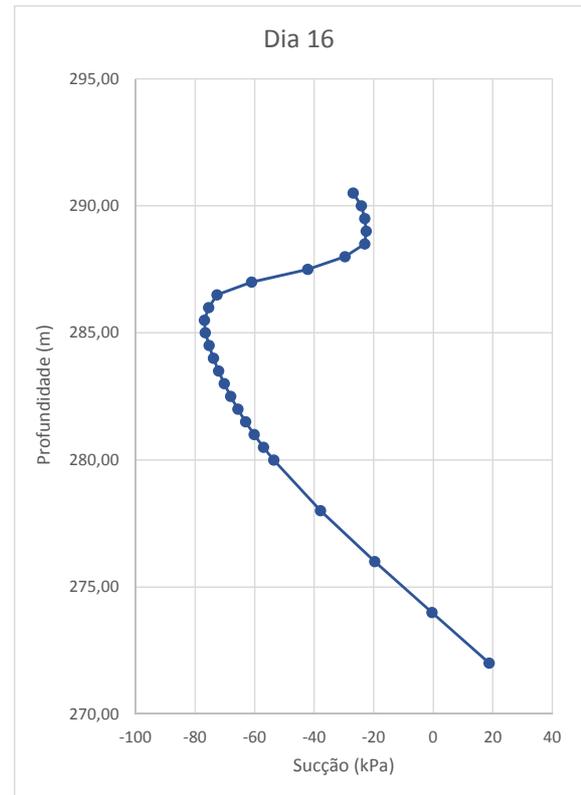
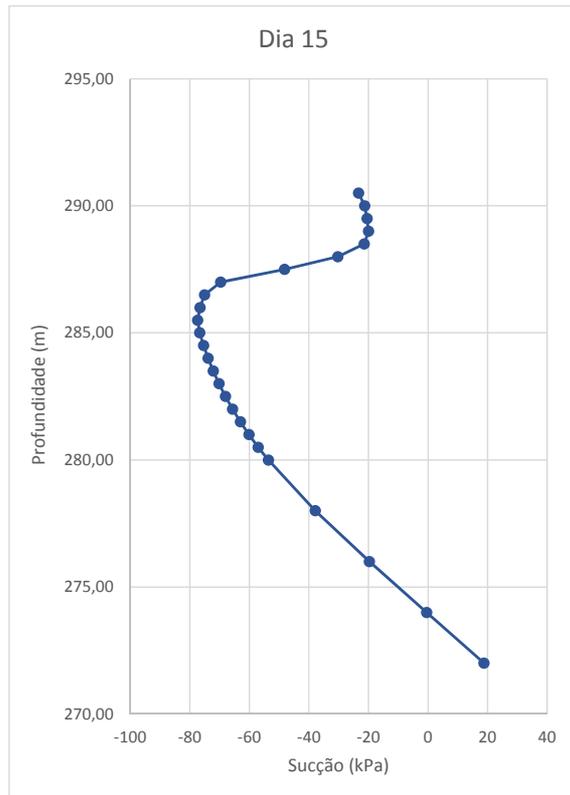
Antes da apresentação das análises de estabilidade, serão mostrados os perfis de poropressão para cada dia de precipitação. Estes dados ajudaram a entender o processo de infiltração em diferentes níveis de precipitação, identificando a variação dos níveis de sucção das camadas superficiais do solo.

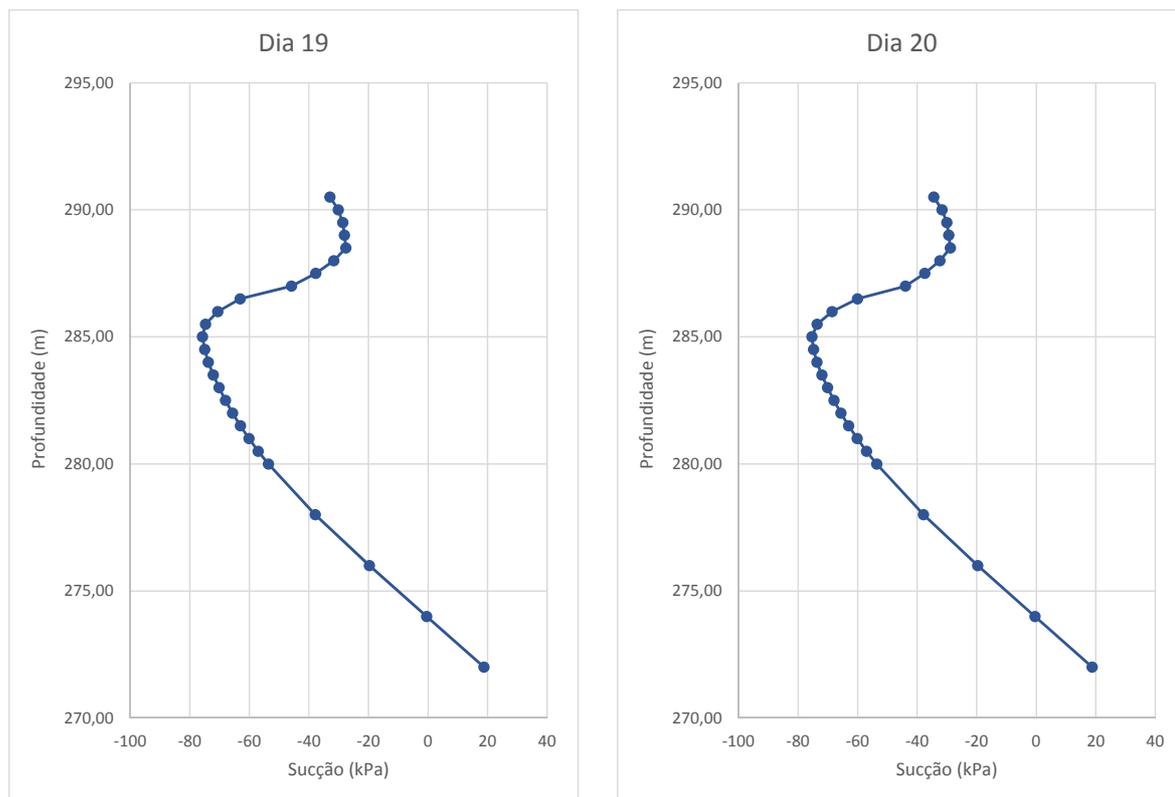












**Figura 62 – Perfis de poropressão – Análise transiente.**

Com base nos perfis de poropressão, apresentados ao longo do tempo, verifica-se a variação dos valores de sucção das camadas superficiais devido ao processo de infiltração.

Para melhor visualização do desenvolvimento dos perfis de poropressão, agrupou-se os perfis de 5 em 5 dias, conforme a Figura 63 abaixo.

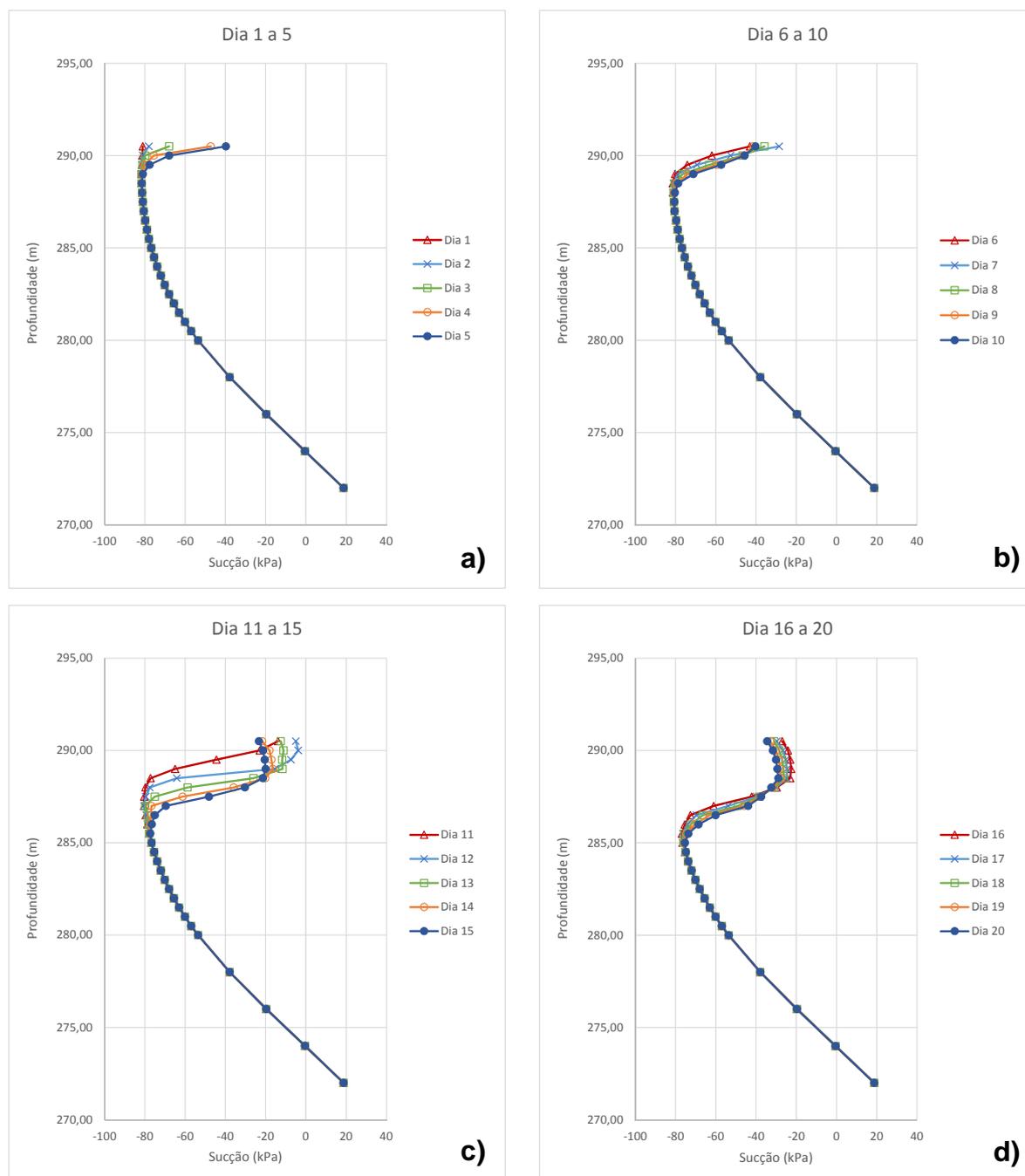


Figura 63 – Perfis de poropressão agrupados – Análise transiente.

Para o primeiro dia, o perfil de poropressão permaneceu muito próximo da condição inicial, uma vez que não foram registradas chuvas neste período.

Verifica-se que partindo da sucção inicial de 80 kPa, ocorre uma tendência de uniformização dos níveis de sucção ao longo da profundidade, nos valores correspondentes às taxas de infiltração aplicadas ao material.

Para os níveis de precipitação registrados nos 20 dias, não ocorre a saturação das camadas superficiais da encosta e a frente de umedecimento não é bem definida, ou seja, apresenta comportamento não uniforme em função da profundidade. Para esta chuva os níveis de sucção foram estabilizados em aproximadamente 20 kPa.

Na primeira semana, entre os dias 2 e 7, foram registradas chuvas de baixa intensidade, tendo o pico de 19,26 mm/dia ocorrido no dia 06/03/2011 (7º dia). Neste período percebe-se o progressivo processo de infiltração da água da chuva, com a formação de uma frente de umedecimento e a consequente diminuição da sucção nas camadas superficiais. No final da primeira semana, e também dia de maior precipitação deste período, registrou-se a maior redução da parcela de sucção, conforme mostra a Figura 63b.

Entre os dias 8 e 9 a chuva permaneceu, porém com intensidades de precipitação inferiores à registrada no 7º dia. A redução dos níveis de precipitação também pode ser observada através do perfil de poropressão apresentado na Figura 63b, onde nestes dias os níveis de sucção aumentaram.

Nos dias 10 e 11 os níveis de precipitação foram de 6,08 e 58,84 mm/dia, respectivamente. No dia 12 registrou-se a maior intensidade de precipitação, atingindo 189,67 mm/dia, e conseqüentemente a maior redução da parcela de sucção, chegando a um valor próximo a 5 kPa para as camadas mais superficiais.

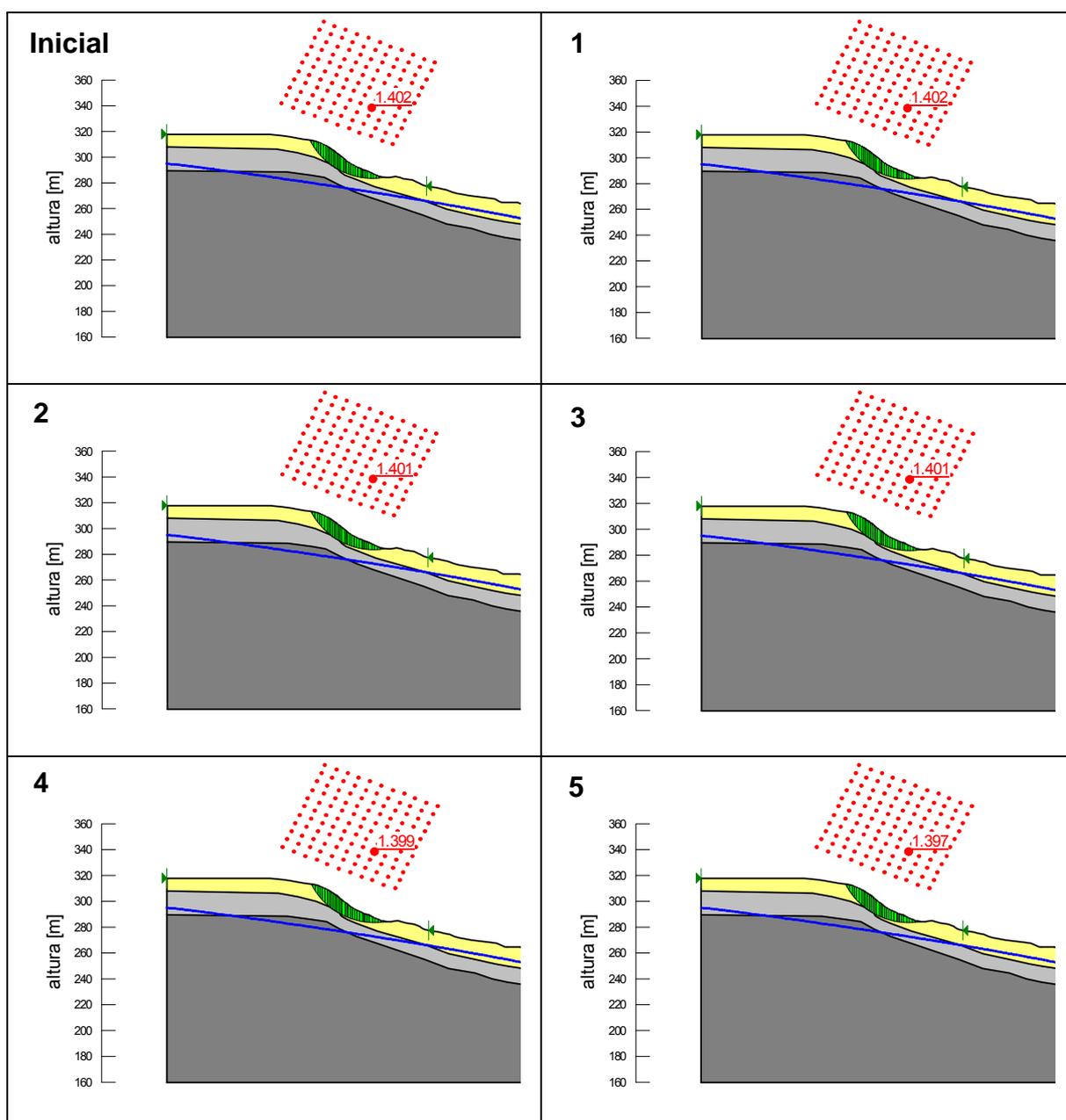
Entre os dias 13 e 18 não foram registradas precipitações de grande intensidade. Percebe-se através dos perfis de poropressão que com a diminuição dos níveis de chuva as camadas superficiais do solo tendem a restaurar os níveis de sucção iniciais. Este comportamento reflete a importância da consideração das chuvas antecedentes nas análises de fluxo transiente e conseqüentemente na estabilidade dos taludes.

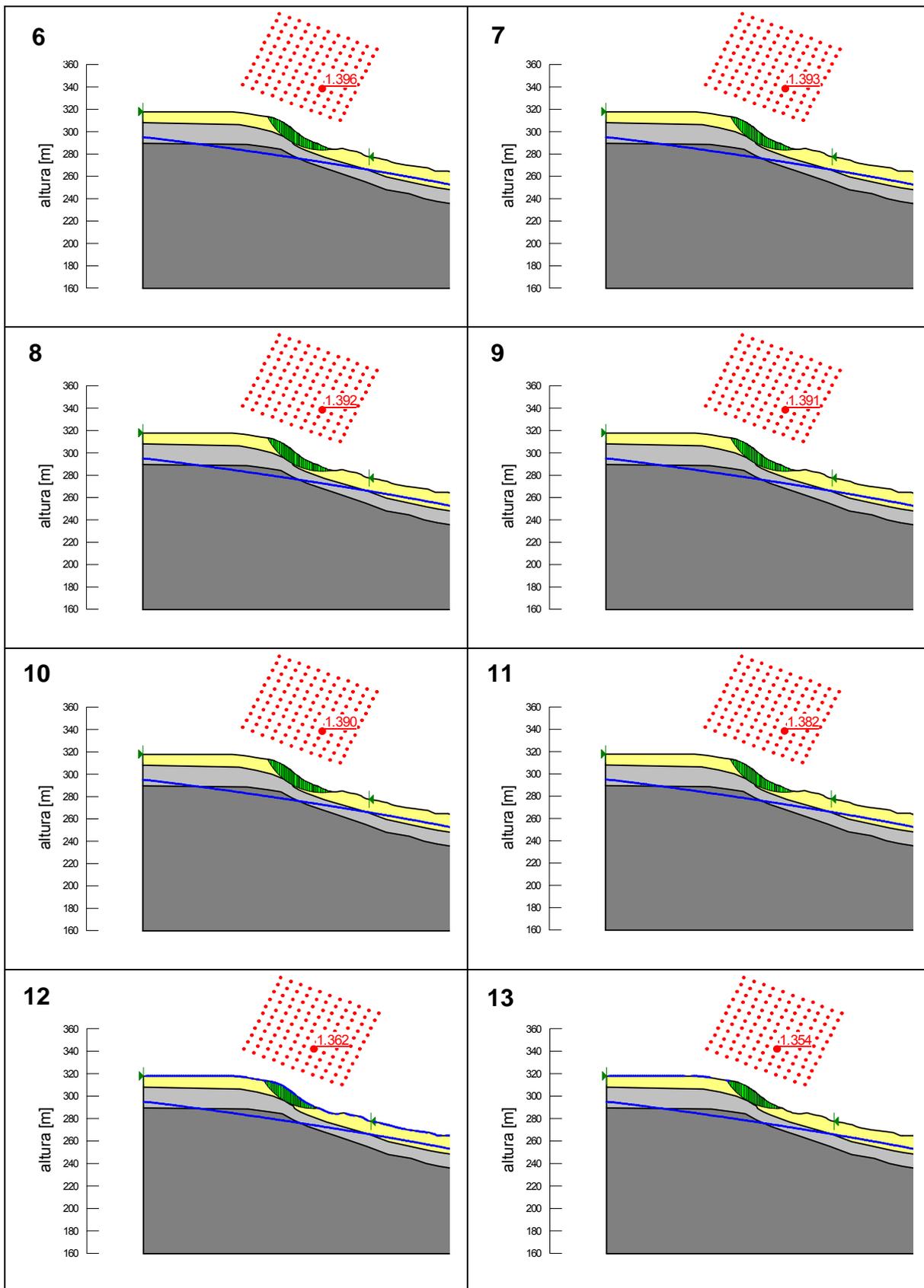
No dia 19 a chuva cessou, não sendo registradas precipitações nos dias 19 e 20.

A tendência de solo em restaurar os níveis de sucção iniciais pode ser verificada através da Figura 63d, onde é possível perceber claramente a inflexão dos perfis de sucção com a diminuição da intensidade de precipitação.

Na sequência serão apresentadas as análises de estabilidade para os 20 dias de precipitação, região superior e inferior, onde será possível perceber a real influência da infiltração na estabilidade global da encosta.

Nas Figuras 64 e 65 estão apresentadas as superfícies críticas de ruptura e seus respectivos fatores de segurança. Primeiramente serão apresentados os resultados referentes a regiões superior da encosta e posteriormente da região inferior.





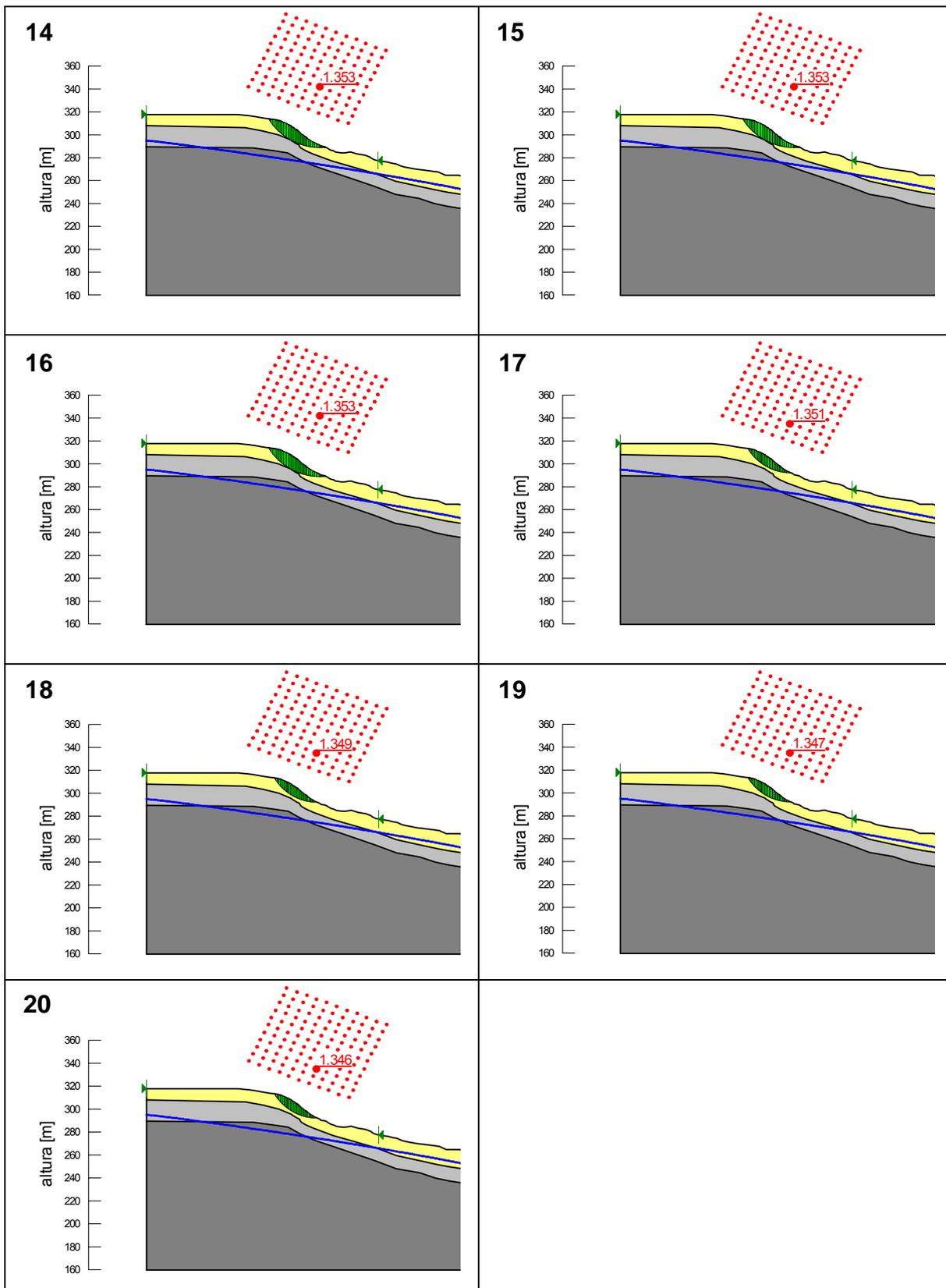
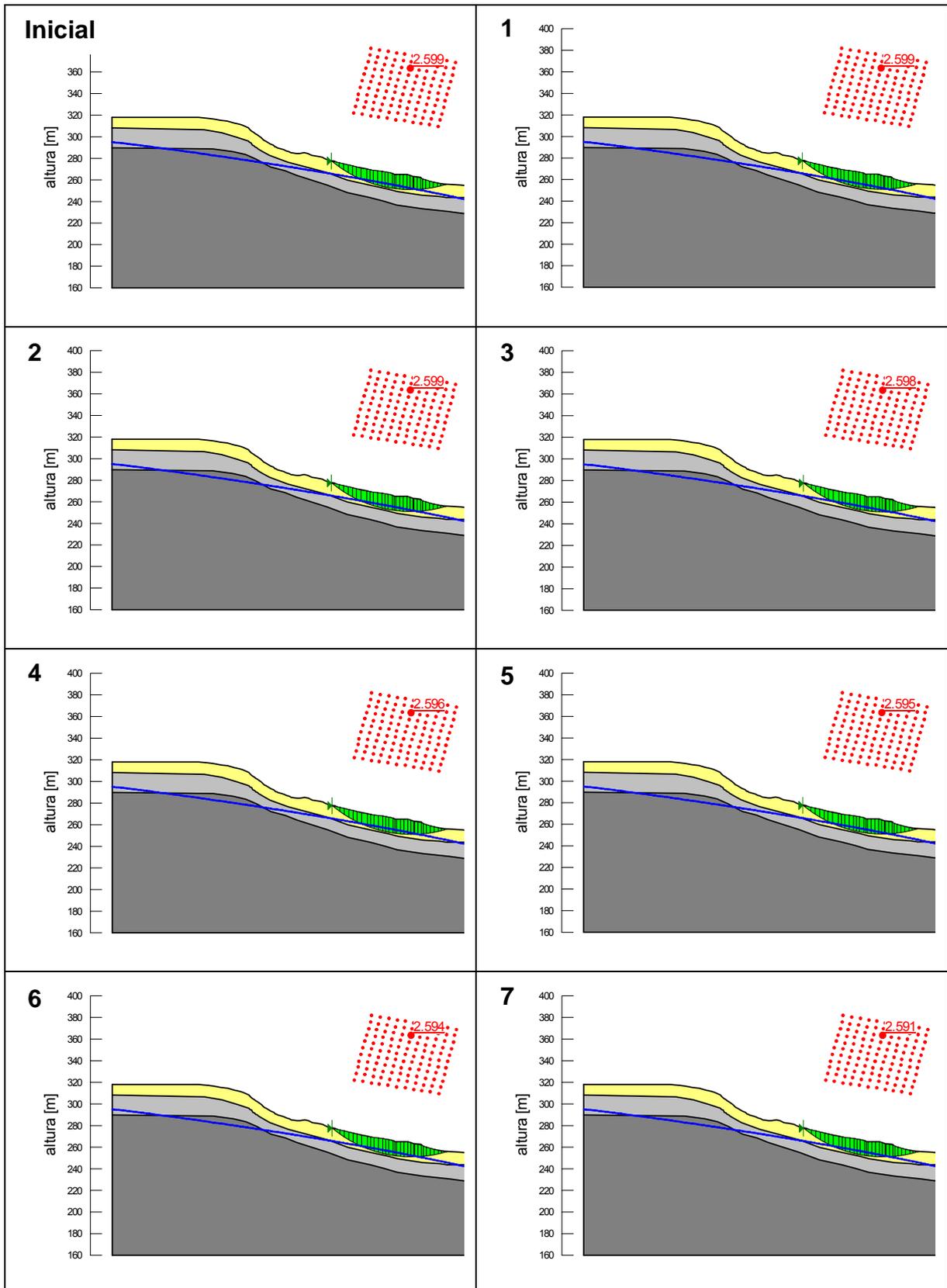
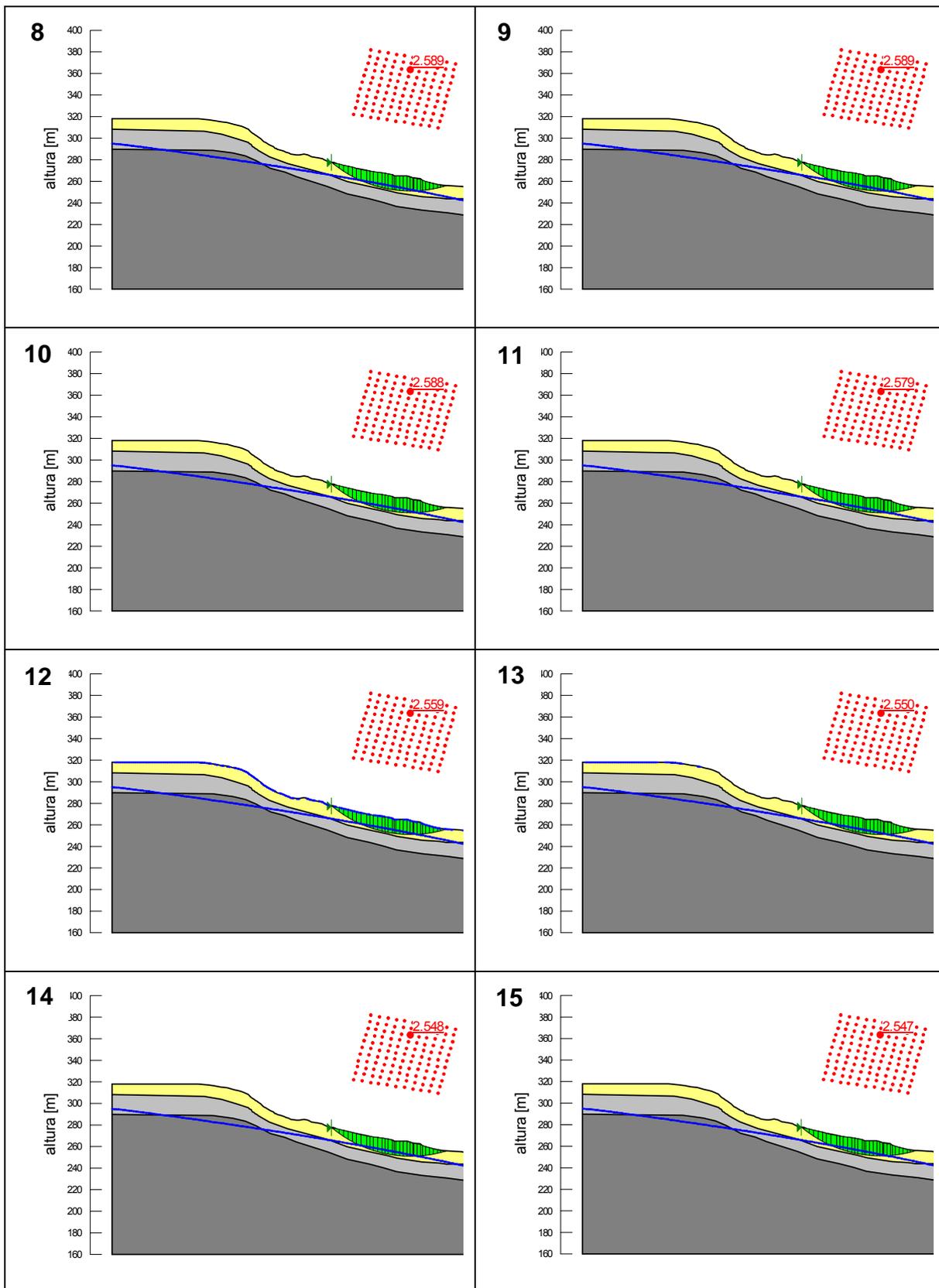


Figura 64 – Análises de estabilidade dos 20 dias – Região Superior.





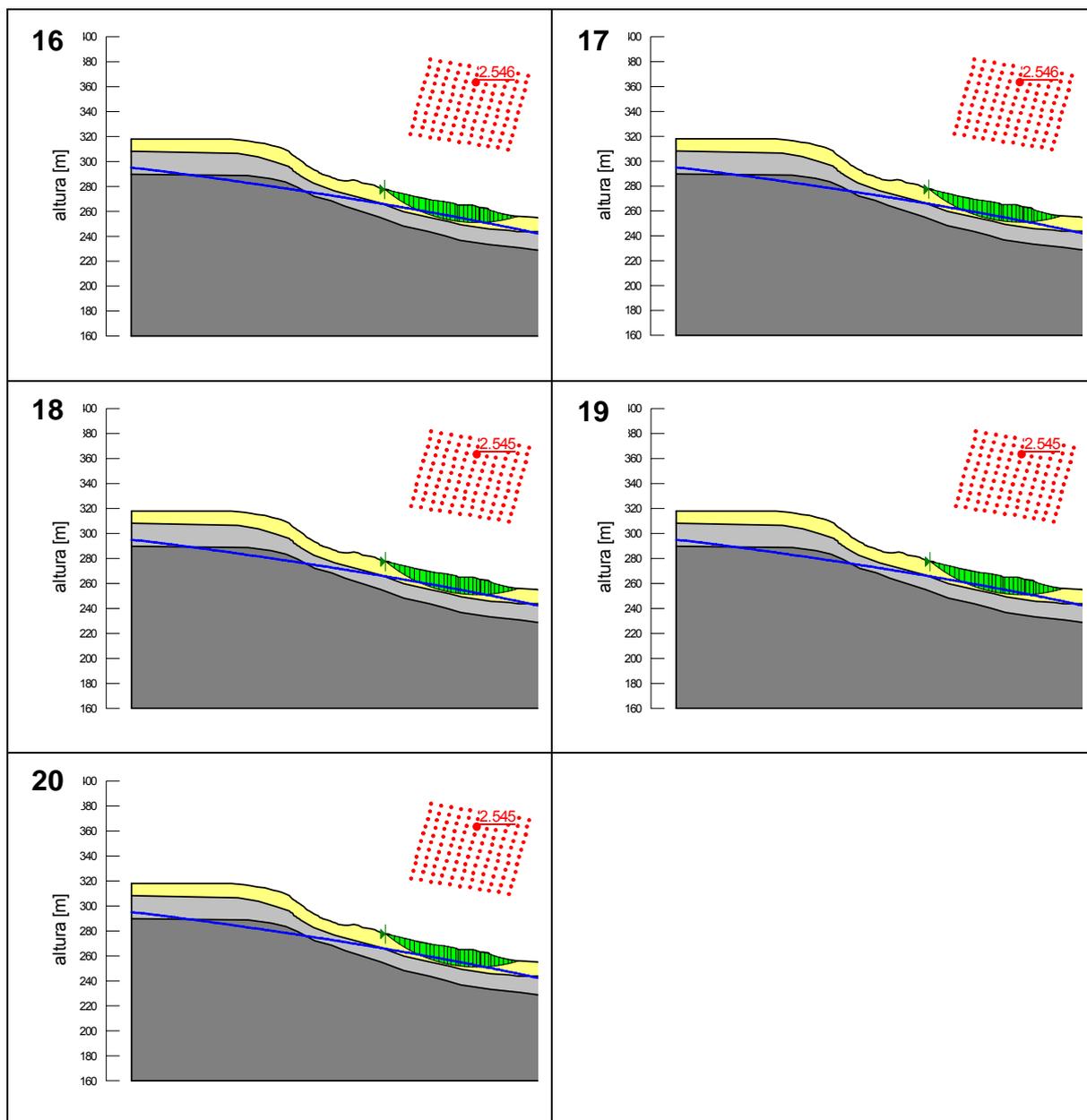
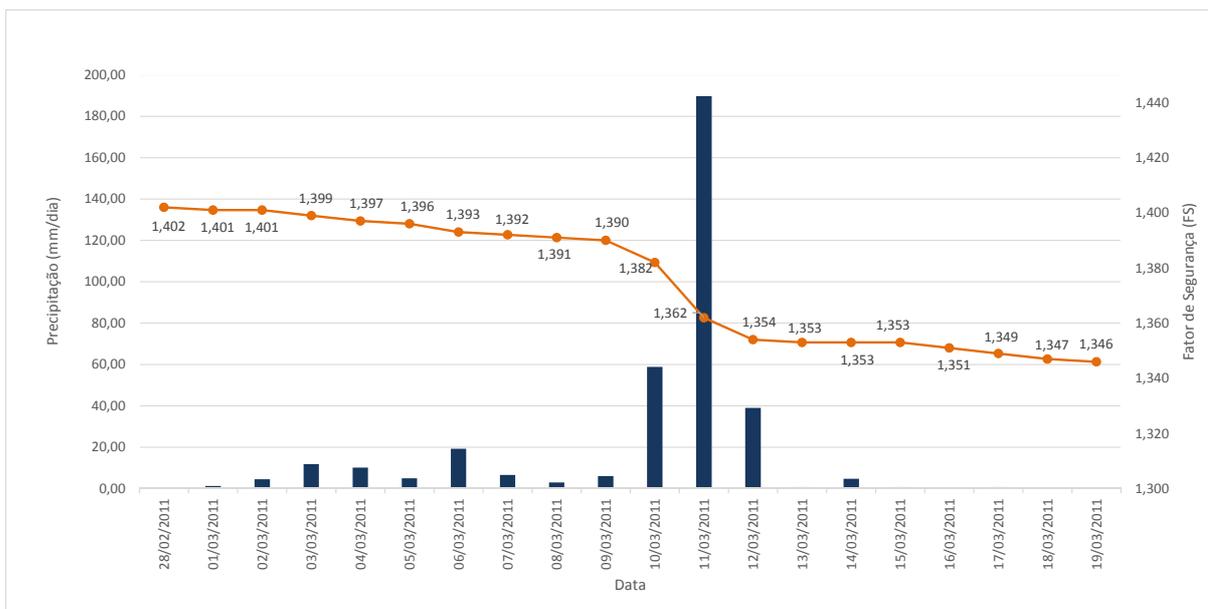
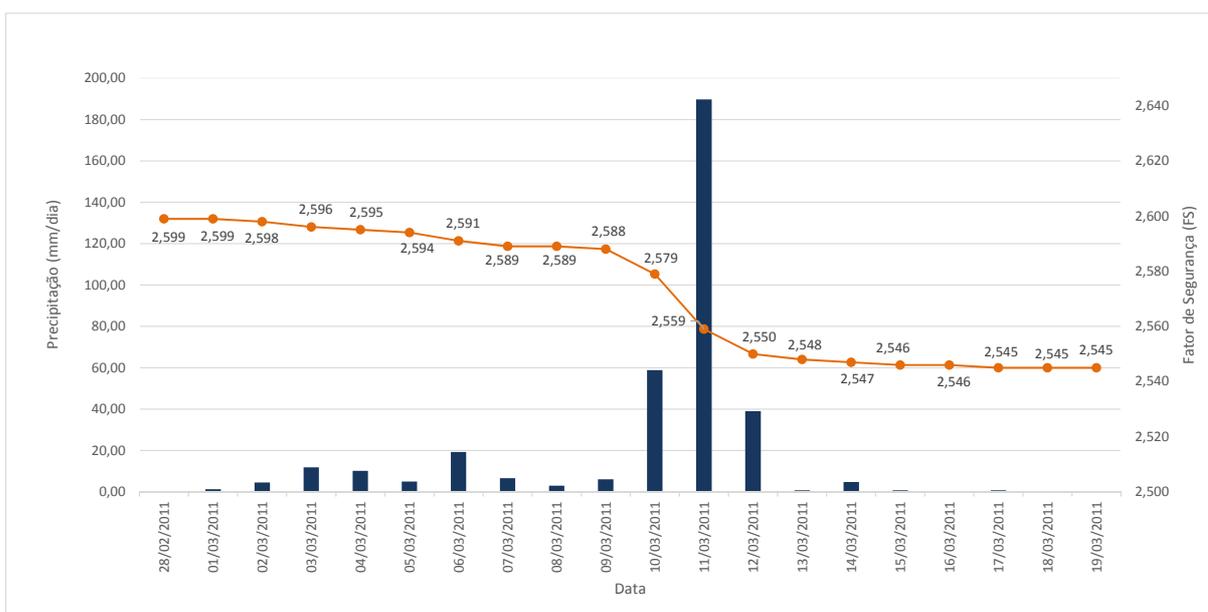


Figura 65 – Análises de estabilidade dos 20 dias – Região Inferior.

Nas Figuras 66 e 67 estão representados os níveis de precipitação e seus respectivos fatores de segurança para a região superior e inferior da encosta, respectivamente.



**Figura 66 – Precipitação vs Fator de segurança – Região Superior.**



**Figura 67 – Precipitação vs Fator de segurança – Região Inferior.**

Através das Figuras 66 e 67, pode-se perceber que o fator de segurança decresce com o passar dos dias em função da constante precipitação. A partir do 18º dia, último dia de chuva, não foram registradas variações nos fatores de segurança, mostrando a tendência do solo a recuperar os níveis iniciais de sucção e consequentemente os fatores de segurança.

Através dos perfis de poropressão apresentados nas Figuras 62 e 63 pode-se perceber que a parcela de sucção permanece se reduzindo para as camadas mais superficiais de solo mesmo que a intensidade de precipitação tenha diminuído.

Através dos gráficos Precipitação *vs* FS é possível perceber que para ambas as regiões da encosta, a variação do fator de segurança segue a mesma tendência, apresentando uma pequena diminuição do fator de segurança nos 10 primeiros dias. Entre os dias 11 e 13 foram registradas as maiores precipitações, acarretando em maiores variações dos fatores de segurança da encosta.

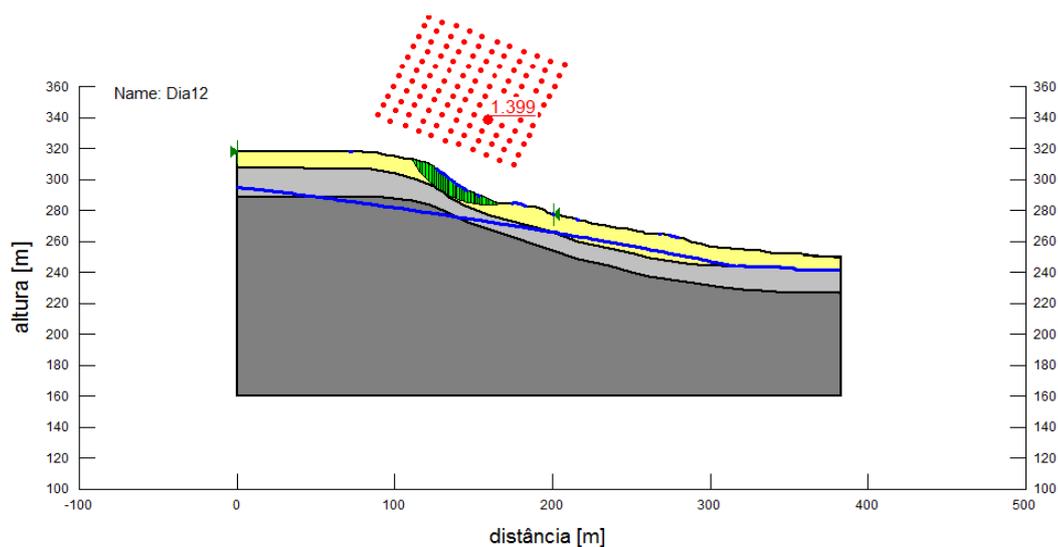
Nos 20 dias de chuva a variação do fator de segurança mostrou-se muito pequena, verificando que os níveis de precipitação

Através do Cenário 4 foi possível perceber a variação do fator de segurança ao longo dos 20 dias de análise, porém esta variação se mostrou muito pequena. Para a região superior da encosta o fator de segurança passou de 1,390 a 1,354, representando uma variação de aproximadamente 2,5%. Para a região inferior a variação registrada foi menor, chegando a 1,2%.

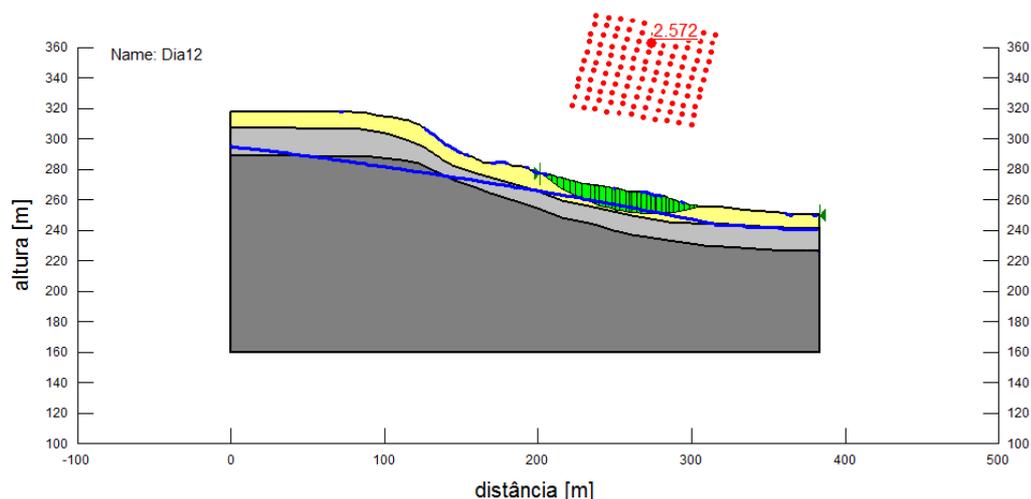
## 5.6 AVALIAÇÃO DE PRECIPITAÇÕES ANTECEDENTES

Com o intuito de verificar a influência de precipitações antecedentes no fator de segurança da encosta, simulações de fluxo e estabilidade foram realizadas.

Partindo da condição inicial de pressão simulou-se a chuva de 189,67 mm, ocorrida no 12º dia, sem a consideração de chuvas anteriores ao modelo. Nas Figuras 68 e 69 estão apresentadas as superfícies de ruptura e seus respectivos fatores de segurança.



**Figura 68 – Avaliação da precipitação antecedente – Região Superior.**



**Figura 69 – Avaliação da precipitação antecedente – Região Inferior.**

Através das análises de estabilidade foi possível verificar que as chuvas anteriores influenciam na estabilidade da encosta, porém a variação é pouco significativa. Os fatores de segurança que antes eram de 1,362 e 2,559 passaram a 1,399 e 2,572, representando uma variação máxima de 2,5% (região superior da encosta).

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões, as quais serão descritas em dois tópicos a se saber: aspectos relacionados aos resultados dos ensaios de laboratório e aspectos relacionados aos resultados obtidos nas simulações.

### 6.1 ASPECTOS RELACIONADOS AOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

As curvas de retenção foram obtidas através da técnica do papel filtro, seguindo as recomendações propostas por Marinho (1994). Foram determinadas as curvas de retenção das amostras A1, A3 e A5 através da medição de 48 pontos de sucção.

Os resultados obtidos de umidade volumétrica e sucção foram ajustados pelo método empírico proposto por Fredlund e Xing (1994), com o auxílio do software Seep/W (GEO-SLOPE, 2007). O método de ajuste utilizado apresentou boa concordância para todos os solos analisados.

O ajuste permitiu observar que as curvas de retenção apresentam um mesmo comportamento físico. Não foram registradas curvas com o comportamento bimodal, característica comum entre os solos residuais e coluvionares. Registrou-se altos valores de sucção, que é uma característica comum entre os solos argilosos e siltosos.

As sucções máximas determinadas através do ensaio foram de aproximadamente 1.100 kPa para o solo A1, 1.500 kPa para o solo A3 e 2.100 kPa para o solo A5. A umidade volumétrica manteve-se alta para ambas as amostras.

Quanto à determinação da condutividade hidráulica dos materiais através da formulação empírica proposta por Van Genuchten, os ajustes se mostraram razoavelmente coerentes. Os valores encontrados ficaram dentro da faixa de  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  cm/s. Estes valores são característicos para muitos solos residuais, conforme Futai (2002).

Um ponto de observação dos ensaios determinados por Vogt (2012) foram os baixos valores de peso específico dos materiais A3 e A5, fato justificável pelo elevado índice de vazios das amostras ensaiadas. Devido a tal característica, os valores da umidade volumétrica de saturação retornaram valores elevados, os quais possuem influência direta na determinação das curvas de retenção.

## 6.2 ASPECTOS RELACIONADOS AOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

### Perfis de Poropressão

Através dos perfis de poropressão foi possível verificar que a precipitação provoca a redução dos níveis de sucção das camadas superficiais e consequentemente a diminuição dos fatores de segurança da encosta.

Em maiores profundidades a variação de poropressão provocada pela precipitação é pequena, sendo praticamente nula para as chuvas de pequena duração.

Por meio dos perfis de poropressão foi possível verificar que o coeficiente de condutividade hidráulica dos materiais e a pressão de entrada de ar definem o processo de infiltração e escoamento superficial.

Com o prolongamento da precipitação (excedente ou não) ocorre a ascensão do nível freático até a saturação do solo em superfície, permitindo assim o desenvolvimento de diferentes perfis de poropressão durante a infiltração.

A velocidade da frente de saturação dos materiais é pequena, característica comum entre solos argilosos. Somente após 50 h de precipitação a frente de umedecimento chega a atingir cerca de 2 m de profundidade.

### Análises de fluxo e estabilidade

Nas análises de estabilidade buscou-se avaliar a influência da consideração da poropressão e do fluxo nos fatores de segurança da encosta. Desta forma buscou-se identificar até que ponto níveis crescentes de refinamento de análises se justificam sob o ponto de vista prático da engenharia.

Na Tabela 16 é apresentado um quadro resumo dos fatores de segurança obtidos nos quatro cenários analisados, com e sem percolação.

**Tabela 16 – Resumo das análises de estabilidade.**

	Sem Percolação		Com Percolação	
	Sem sucção	Com sucção	Estacionária	Transiente
	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>	<b>Cenário 4</b>
Superior	1,12	1,37	1,40	1,40 – 1,35
Inferior	2,36	2,51	2,60	2,60 – 2,54

A variação do fator de segurança registrada no Cenário 2 decorre exclusivamente da sucção matricial do material. Registrou-se para região superior da encosta uma variação de 22,3% no fator de segurança, contra 6,40% na região inferior, em comparação ao Cenário 1.

Os números apresentados mostram claramente a importância da consideração da sucção na análise de estabilidade de encostas naturais em meio não saturado.

Sob o ponto de vista prático da engenharia o aumento dos fatores de segurança, em decorrência da consideração da poropressão, podem justificar a estabilidade de diversas encostas naturais, evidenciando assim a importância da utilização e da determinação correta dos parâmetros hidráulicos do solo.

Através do Cenário 3, onde considerou-se fluxo, foi possível verificar um pequeno aumento do fator de segurança da encosta. Esta variação pode estar associada ao processo de limitação dos níveis de sucção, os quais foram realizados por dois métodos distintos, equilíbrio limite e método dos elementos finitos.

Observou-se através do Cenário 4 (análise transiente), em que simulou-se a situação de maior grau de refinamento, que o perfil de sucção possui correlação direta

com as chuvas anteriores, ou seja, percebe-se uma progressiva recuperação dos níveis de sucção das camadas superficiais quando os níveis de precipitação diminuem.

No dia da chuva de maior intensidade, conforme esperado, registrou-se a maior redução dos níveis de sucção das camadas superficiais, chegando a valores próximos a 5 kPa.

Não foram registradas variações nos fatores de segurança após a chuva cessar (18º dia), mostrando a tendência do solo recuperar os níveis iniciais de sucção e conseqüentemente os fatores de segurança.

Conclui-se através dos quatro cenários analisados que a consideração da sucção ou poropressão garantem maiores fatores de segurança a encosta. Já para as análises de fluxo estacionário e transiente, os valores encontrados retornaram F.S muito próximos a condição sem percolação (Cenário 2).

#### Aspectos gerais

Observou-se que o desenvolvimento dos perfis de sucção tem reflexo direto na estabilidade da encosta, onde a taxa de redução do fator de segurança está diretamente ligada à velocidade de avanço da frente de umedecimento e de ascensão do nível freático da encosta.

### 6.3 TRABALHOS FUTUROS

Considerando as conclusões obtidas a partir deste estudo é possível elencar algumas sugestões para trabalhos futuros:

- ✓ Determinação da permeabilidade saturada *in situ*, através da utilização de infiltrômetros do tipo “mini disco”.
- ✓ Coletar amostras indeformadas do horizonte de solo residual, para a determinação dos parâmetros hidráulicos do material, como curva de retenção e de condutividade hidráulica.
- ✓ Avaliar a resistência ao cisalhamento e a distribuição das poropressões ao longo da superfície crítica de ruptura, verificando as reais influências da precipitação nos parâmetros de resistência dos materiais.

## CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1991. **Estabilidade de Taludes (NBR 11.682/1991)**. Brasil.

AMARAL, C. Landslides disasters management in Rio de Janeiro. **Proceedings of the 2<sup>nd</sup>. Pan-American Symposium on Landslides**. P.209-212. 1997.

AVILA, D.; ROJAS, J. C.; SALINAS, L. M. **Effect of rainfall on the stability of a slopes**. In. 2<sup>nd</sup> Asian Conference on Unsaturated Soils – Geotechnical and Geoenvironmental Issues, 2003, Osaka, Japan, pp. 475-480, 2003.

BISHOP, A. W. **The use of the slip circle in the stability analysis of slopes**. Geotechnique, 5, pp-7-17, 1955.

BLIGHT, G. E. **Case histories of shear strength-controlled aspects of residual soils**. Mechanical of residual soils, pp+221-237, 1997.

BRAND, E. W. **Geotechnical Engineering in Tropical Residual Soil**. First International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soil, Brasília, Proceedings, Vol. 3, pp. 23-91, 1985.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional do Petróleo. **Anuário Estatístico Brasileiro, Gás Natural e Biocombustíveis 2013**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 18 julho de 2014.

BRESSANI, L. A.; HORN, M. R.; BICA, A. V. D.; GEHLING, W. Y. Y. **Estudo da resistência ao cisalhamento de um solo residual de granito da região metropolitana do Porto Alegre**. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 3, Rio de Janeiro, Vol.1, pp.199-206, 1997.

BRESSANI, L. A.; HORN, M. R.; BICA, A. V. D.; GEHLING, W. Y. Y.; KUNST, L. R. **Field suction measurements in a residual soil slope**. In: Panamerican Symposium on Landslides, 2, Rio de Janeiro, ABMS, Vol.1, pp.363-369, 1997.

CALLE, J. A. C. **Análise de ruptura de talude em solo não saturado**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

CARDOSO Jr, C. R. **Estudo do Comportamento de um Solo Residual de Gnaisse Não Saturado para Avaliar a Influência da Infiltração na Estabilidade de Taludes**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

CARVALHO, C. S. **Estudo da infiltração em encostas de solos insaturados na Serra do Mar**. Tese (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo, 1989.

CENPES – Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello. **Avaliação do comportamento geomecânico do maciço no acidente do duto OLAPA (km 57+50m)**. Relatório técnico, CT-031/2001. Rio de Janeiro, 2001.

CHANDLER, R. J., CRILLY M. S.; MONTGOMERY S. H. G. **A low cost method of assessing clay desiccation of the institution of civil Eng**. Vol.92, 1992.

CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE. **Methods of prevention, detection and control of spillages in European oil pipelines**. Brussels, May 1998. Report 1/98. Disponível em: <http://www.concawe.be/content/default.asp?PageID=569>. Acesso em: 20 junho de 2011.

CORDANI, U. G.; GIRARDI, V. A. V. **Geologia da Folha de Morretes**. Boletim da Universidade Federal do Paraná, 1967.

DIAS, C. O. **Determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados. Dissertação de mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – PPGECC - Geotecnia, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná – UFPR. 2012.

FARAH, F. **Habitação e encostas**. Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT. Coleção Habitare. São Paulo, 2003.

FARIAS, M. M. **Modelagem tridimensional e estudo de estabilidade com abordagem probabilística de uma encosta da Serra do Mar**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

FELLENIOUS W. **Calculation of the stability of earth of earth dams.** Proc. 2<sup>nd</sup> Congress on large Dams. 4, pp.445-463, 1936.

FEUERHARMEL, C. **Determinação das curvas características de solos coluvionares pelo uso combinado da placa de sucção e método do papel filtro.** 5<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Volume I, pp.243-248. São Carlos, 2004.

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

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, vol.30, n.4, p.521-532. 1994.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils.** John Wiley e Sons, Inc. Canadá, 1993.

FUTAI, M. M. **Estudo teórico-experimental do comportamento de solos tropicais não saturados: Aplicação a um caso de voçorocamento.** Tese (Doutorado). COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

GEO-SLOPE. **Seepage Modeling with Seep/W - An Engineering Methodology.** Manual do usuário. Geo-Slope International Ltd. Canadá, 2007.

GEO-SLOPE. **Stability Modeling with Slope/W - An Engineering Methodology.** Manual do usuário. Geo-Slope International Ltd. Canadá, 2004.

GEOPROJETOS. **RE-351-06 – Diagnóstico das causas do acidente na encosta do acidente na encosta e proposição de ações estabilizantes.** Geoprojetos Engenharia Ltda. Publicação Interna. Rio de Janeiro, 2001.

GERSCOVICH, D. M. S. **Fluxo em meios porosos saturados – não saturados: Modelagem numérica com aplicações ao estudo de estabilidade de encostas do Rio de Janeiro.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Geotecnia – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1994. 244p.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamento em meio tropical úmido.** São Paulo, IPT, 48p. (IPT pub. 1080), 1976.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação.** Editora Edgard Blucher. 2ª edição. São Paulo, 1984.

JAMBU, N. **Application of composite slip surfaces for stability analysis.** Proceedings, European Conference on the Stability of Earth Slopes, Stockholm, Vol.3, p.43-49, 1954.

JESUS, A. C. **Retroanálise de Escorregamentos em Solos Residuais Não Saturados.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. **Review of soil-water characteristic curve equations.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123 (2): 1106-1117, 1997.

LOPES, M. B.L. **Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. PUC-RJ. Rio de Janeiro, 2006.

LU, N.; LIKOS, W.J. **Unsaturated Soil Mechanics.** John Wiley e Sons, 2004.

LUMB, P. Slope failures in Hong Kong. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v.8, p. 31-65, 1975.

MARCHESINI, I. A. **Análise Determinística, Probabilística e de Sensitividade de um Talude Situado na Serra do Mar do Paraná.** Monografia de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

MARINHO, F. A. M. **Medição de sucção com o método do papel filtro.** In: Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2, 515-522, 1994.

MARINHO, F. A. M. **Nature of soil-water characteristic curve for plastic soils.** Geotech. Geoenviron. Eng., pgs. 654-661, 2005.

MATOS, M. M. **Stability of slopes in residual soils**. Master Thesis – Department of Civil Engineering – University of Alberta, Canadá, 1974.

MINEROPAR – **Mapa Geológico do Estado do Paraná**. Disponível em: <http://www.mineropar.com.br>. Acesso em: 18 julho de 2014.

MIQUELETTO, M. **Desenvolvimento de procedimentos numéricos para análise de infiltração e estabilidade de taludes em bacias de drenagem**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2007.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. **The analysis of the stability of general slip surfaces**. Geotechnique, Vol.15, pp.79-83, 1965.

MORGENSTERN, N.; MATOS, M. M. **Stability of slopes in residual soils**. 5<sup>th</sup> Pan-American Congress of Soil Mechanics, pp.368-383, 1975.

NADIM, F.; LACASSE, S. **Mapping of Landslide Hazard and Risk Along the Pipeline Route**. Terrain and geohazard challenges facing onshore oil and gas pipelines. Londres, 2004.

NG, G. W.; SHI, Q. **A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage**. Computers and Geotechnics, Vol. 22n, pp.1-28, 1998.

NUNES, F. G. **Levantamento de áreas de riscos a partir da dinâmica geoambiental das encostas da serra do mar no Paraná**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

O ESTADO DO PARANÁ. **O dinheiro paga?** Notícia de 20/01/2001. Disponível em: <http://ww.sefloral.com.br/petrobras30.htm> Acesso em: 18 julho 2014.

OLIVEIRA, H. R. **Gerenciamento da integridade de dutos: proposta de abordagem aos riscos geotécnicos em gasodutos de transmissão**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

PEDROSA, M. G. A.; SOARES, M. M.; LACERDA, W. A. **Mechanism of Movements in Colluvial Slopes in Rio de Janeiro**. In: 5<sup>th</sup> International Symposium on Landslides. Lausanne, pp.1211-1216. 1988,

PEIXOTO, V. C. **Análise paramétrica e dimensionamento de poços de infiltração para fins de drenagem urbana**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

PEZZOTTA, C. A. **A Importância da medição precisa de tensões residuais em dutos**. Revista TN Petróleo. Disponível em: <http://www.tnpetroleo.com.br/noticia/21903/a-importancia-da-medio-precisa-de-tensoes-residuais-em-dutos>. Acesso em: 17 maio de 2010.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manoele, 2004.

ROCHA, R. P. O. **Instrumentação geotécnica com fibra ótica: monitoramento de frente de umedecimento e análise da variação do grau de saturação em solos arenosos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2011.

ROHM, S. A. **Resistência ao cisalhamento de um solo arenoso laterizado não saturado da região de São Carlos**. Tese de Doutorado. EESC-USP. São Paulo, 1992.

SANTOS, R. C. **Análise paramétrica da infiltração e sua influência na estabilidade de taludes em solo não saturado**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo. 2004.

SCHILLING, G. H. **Instrumentação e Análise do Escorregamento da Encosta do Soberbo, Alto da Boa Vista – RJ**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 1993.

SPENCER, E. **A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces**. Geotechnique, Vol.17, pp.11-26, 1967.

SOARES, A. B. **Fluxo de Água em Talude Arenoso: Modelagem Física e Numérica**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, P. S. **Comportamento mecânico e hidráulico de um solo residual do granulito-gnaiss de Salvador e sua aplicação no estudo de mecanismos de instabilização de taludes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2006.

SUZUKI, S. **Propriedades geomecânicas de alguns solos residuais e coluviais ao longo do oleoduto Curitiba-Paranaguá**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E. S.; ROCHA, M. C. M. **Análise de correlação entre Chuvas e Escorregamentos – Serra do Mar, Município de Cubatão**. 5º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia – CBGE, Vol.2, pp. 225-236, 1987.

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**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2009.

SANTOS, C. R.; VILLAR, O. M. **Análise paramétrica da estabilidade de taludes em solos não saturados: a influência do tipo de solo**. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 5, São Carlos: SGS/EESC-USP, v.1, pp-181-188, 2004a.

SANTOS, C. R.; VILLAR, O. M. **Análise paramétrica da influência da condutividade hidráulica e da curva de retenção na infiltração e na estabilidade de taludes em solos não saturados**. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 5, São Carlos: SGS/EESC-USP, v.1, pp-189-194, 2004b.

SILVEIRA, R. M. **Propriedades Geotécnicas dos Solos Coluvionares do Gasoduto Bolívia – Brasil em Timbé do Sul (SC)**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

SUZUKI, S. **Propriedades geomecânicas de alguns solos residuais e coluviais ao longo do oleoduto Curitiba-Paranaguá**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

UFPR – Universidade Federal do Paraná. **Metodologias de Avaliação de Segurança e Monitoramento de Taludes Terrestres**. Projeto UFPR/PETROBRÁS/FUNPAR. Projeto de Pesquisa – Relatório Interno, não publicável. Curitiba, 2013.

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**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

TOWNSEND, F. C. **Geotechnical Characteristics of Residual Soils**. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 11, ASCE, pp.77-94, 1985.

USACE – United States Army Corps of Engineers. **Design manual EM-1110-1-1902: Stability of Earth and Rockfill Dams**. Washington, 1990.

USACE – United States Army Corps of Engineers. **Design manual EM-1110-2-1901: Seepage analysis and control for dams**. Washington, 1993.

USACE – United States Army Corps of Engineers. **Design manual EM-1110-2-1908: Instrumentation of Embankment Dams and Levees**. Washington, 1995.

USACE – US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Risk-based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies**. ETL 1110-2-556. Washington, 1999.

USACE – United States Army Corps of Engineers. **Design manual EM-1110-2-2300: General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams**. Washington, 2004.

USGS – U.S. **Geological Survey Home page**. Disponível em: <http://www.pbs.usgs.gov/fs/2004/3072>. Acesso em: 18 julho de 2014.

VAN GENUCHTEN, M. A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, vol.44, n.5, p.892-898. 1980.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G. **Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength**. Advances in Unsaturated Geotechnics, Geodenver, pp.143-159. Colorado, 1994.

VARGAS Jr., E. A.; COSTA FILHO, L. M; CAMPOS, L. E. P. **A study of the relationship between the stability of slopes in residual soils and rain intensity**. International Symposium On Environmental Geotechnology, Bethlehem, USA, Proceedings, pp.491-500, 1986.

VARGAS, M. **Revisão Histórico-Conceitual dos Escorregamentos da Serra do Mar**. Solos e Rochas, volume 22, nº.1, pp.53-83. São Paulo, 1999.

VIEIRA, A. M.; MARINHO, F. A. M. **Variação sazonal de sucção em um talude de solo residual em São Paulo**. In: COBRAE, 3, Rio de Janeiro, ABMS, pp.287-295, 2001.

VILAR, O. M. **Formulação de um modelo matemático para a erosão dos solos pela chuva**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1987.

VILAR, O. M. **Introdução a mecânica dos solos não-saturados**. Notas de aula. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

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

WOLLE, C. M.; GUIDICINI, G.; ARAUJO, J. S.; PEDROSA, A. **A slide mechanism in the slopes of the Serra do Mar Southern Brazil**. In: International Conference of Engineering Geology, 3, Madrid. Proceedings., 14pp, 1978.

WOLLE, C. M. **Análise dos escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo, 1988.

WOLLE, C. M. **Peculiarities of *in situ* behavior of tropical soils: slope stability**. Committee on tropical soils. In: International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, 1<sup>st</sup>, Brasília, 1985.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil. **Revista Solos e Rochas**: São Paulo, 12: 27-36, 1989.

WOLLE, C.M.; HACHICH, E. Rain-induced landslides in southeastern Brazil. **Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, vol.3, p.1639-1644. 1989.

ZHAN, T. L. T.; NG C. W. W.; ASCE M. Analytical Analysis of Rainfall Infiltration Mechanism in Unsaturated Soils. **International Journal of Geomechanics**, 2004.

YOMURA, D. M. **Análise de estabilidade de talude coluvionar da Serra do Mar do Paraná considerando diferentes condições de fluxo no subsolo**. Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.