

**ALINE FREITAS DA SILVA**

**ESTUDO DE PREVISÃO DE ESCORREGAMENTO  
A PARTIR DO FATOR DE SEGURANÇA 3D:  
CAMPOS DO JORDÃO-SP**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de  
São Carlos da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

São Carlos/SP

2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Silva, Aline Freitas da

S586e

Estudo de previsão de escorregamento a partir do fator de segurança 3D : Campos do Jordão-SP / Aline Freitas da Silva ; orientador Lázaro Valentin Zuquette. -- São Carlos, 2009.

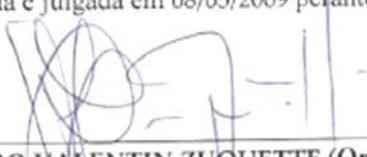
Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

1. Geotecnia. 2. Escorregamento. 3. Fator de segurança 3D. 4. Campos do Jordão. I. Título.

**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidata: Geóloga **ALINE FREITAS DA SILVA**

Dissertação defendida e julgada em 08/05/2009 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **LÁZARO VALENTIN ZUQUETTE (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

*Aprovada*

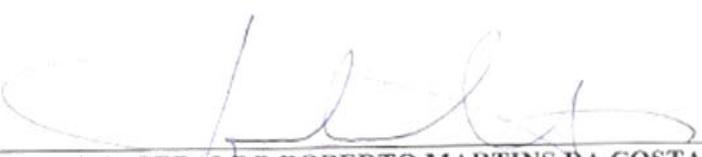
  
\_\_\_\_\_  
Profª. Drª. **TEREZINHA DE JESUS BONUCELLI**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

*aprovada*

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **REINALDO LORANDI**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

*Aprovado*

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **LÁZARO VALENTIN ZUQUETTE**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Geotecnia

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**  
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC



# DEDICATÓRIA

*Para minha eterna garotinha,  
minha boxer, Raia.*



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Ele que permite que tudo em minha vida seja possível, mesmo eu não sendo merecedora de tanta coisa.

A minha família que mesmo sem entender o porquê de eu fazer isso torcem e oram por mim. Às vezes precisam ser convencidos de que eu quero estar aqui apesar da distância e da imensa saudade.

Ao Lázaro Valentin Zuquette que aceitou o desafio de me orientar e que por muitas vezes fez mais do que isso, sempre visando além do meu crescimento profissional.

Ao CNPQ pela bolsa de mestrado concedida.

A família que eu escolhi, meus amigos “são-carlenses”, Dani Cenci, Vagner, Dani Japa, Rafa, Ju, Elaine, Léo, Júnio, Simone, Felipe, Carla, Osvaldo, Wanessa, Claudinha, Cris, Aline e Nicolas. São pessoas que conquistei e fui conquistada e que foram essenciais em diversos momentos dessa jornada.

Aos mapeadores e grandes amigos, Júnio, Simone, Felipe, Marcilene, Claudinha e Miguel, que devido à amizade e companheirismo tornam o “lab” uma extensão das nossas casas.

Em especial ao Júnio que por diversas vezes abdicou do seu tempo para me ajudar com a minha pesquisa. Diversas foram as suas contribuições em todas as fases do trabalho, nunca vou me esquecer disso, obrigada por tudo!

A todos os funcionários e técnicos do Departamento de Geotecnia, em especial a Maristela, Álvaro, Neiva, Zé Luis, Oscar e Seu Antônio.

Aos meus amigos do Rio, que continuam me incentivando e apoiando as minhas decisões, Dean, Manu, Natália, Carol, Xico, Shinzato, as Shinhas e as Lulus. Não sei explicar o quão importante isso é para mim.

Aos meus amigos mais recentes e que já fazem parte da minha história, o apoio de vocês nessa fase final foi fundamental. Obrigada por tudo galera do Longão, em especial a Laura, Ava, Daniel, Kathe, Camila, Janu, Dri e Marcel.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Mais uma vez digo que me considero uma pessoa iluminada, pois sinto que tenho muitas pessoas a agradecer e percebo que no fim esta página é a mais importante do meu trabalho – uma tentativa de retribuição do carinho a mim destinado.

O meu mais sincero: Valeu!



*“Sem sacrifícios não se alcança benefícios”*



## RESUMO

SILVA, A.F. Estudo de previsão de escorregamento a partir do fator de segurança 3D: Campos do Jordão-SP. 2009. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre procedimentos de estudos sobre escorregamento, com enfoque para as metodologias de previsão a partir da combinação de conhecimentos de modelagem hidrológica e análise determinística tendo como base a avaliação do Fator de Segurança 3D. Foi desenvolvido um conjunto de procedimentos que permitam a previsão de escorregamentos em escalas maiores que 1:10.000 e estes foram aplicados em oito áreas na cidade de Campos do Jordão (SP). Os resultados obtidos para estas áreas são bastante promissores e refletiram as condições geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas de cada área.

Palavras-chave: Escorregamento. Fator de Segurança 3D. Campos do Jordão.

## **ABSTRACT**

SILVA, A.F. Study of landslide prediction through three-dimensional factor of safety: Campos do Jordão-SP. 2009. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

This work presents a review of procedures for landslides studies, with focus on the methodologies of forecasting from the combination of knowledge of hydrological modeling and analysis based on deterministic evaluation of the 3D factor of safety. It was developed a set of procedures for the prediction of landslides on scales larger than 1:10,000, and these were applied in eight areas in the city of Campos do Jordão (SP). The results for these areas are very promising and reflected the geological, geotechnical and hydrogeological conditions in each area.

Keywords: Landslide. Three-dimensional factor of safety. Campos do Jordão.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de queda provocada por ondas (Modificado de British Geological Survey, Fonte: <a href="http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/gallery.jsp">http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/gallery.jsp</a> ).....	34
Figura 2 – Exemplo de queda (Paraná, Brasil).....	34
Figura 3 – Processo de tombamento (Modificado de British Geological Survey, Fonte: <a href="http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/gallery.jsp">http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/gallery.jsp</a> ).....	35
Figura 4 – Exemplo de tombamento (Bragança Paulista, SP). ....	36
Figura 5 – Processo de rastejo (Modificado de British Geological Survey, Fonte: <a href="http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/gallery.jsp">http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/gallery.jsp</a> ).....	37
Figura 6 – Exemplo de rastejo e de evidência em campo (tronco de árvore torto) (Fontes: <a href="http://ngdir.org/SiteLinks/Kids/Image/erathquake%20-en/glossary/creep-mm.jpg">http://ngdir.org/SiteLinks/Kids/Image/erathquake%20-en/glossary/creep-mm.jpg</a> e <a href="http://geology.about.com/od/naturalhazardsclimate/ig/Landslides/treecreep.htm">http://geology.about.com/od/naturalhazardsclimate/ig/Landslides/treecreep.htm</a> ). ...	37
Figura 7 – Processo de fluxo (Modificado de British Geological Survey, Fonte: <a href="http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/gallery.jsp">http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/gallery.jsp</a> ).....	38
Figura 8 – Exemplo de fluxo de detritos (Blumenau, Santa Catarina).....	39
Figura 9 – Exemplo de avalanche (Alpes) (Fonte: <a href="http://www.alpine-guides.com/images/ski%20avalanche%20safety.jpg">http://www.alpine-guides.com/images/ski%20avalanche%20safety.jpg</a> ). ....	40
Figura 10 – Processo de expansão lateral (Adaptado de Varnes, 1978). ....	41
Figura 11 – Exemplo de expansão lateral (Cidade de Manzanillo, México) (Fonte: <a href="http://research.eerc.berkeley.edu/projects/GEER/GEER_Post%20EQ%20Reports/Tecoman_2003/c-land.html">http://research.eerc.berkeley.edu/projects/GEER/GEER_Post%20EQ%20Reports/Tecoman_2003/c-land.html</a> ). ....	41
Figura 12 – Processo de escorregamento rotacional (Adaptado de Infanti Jr. e Fornasari Filho, 1998). ....	43
Figura 13 – Exemplo de escorregamento rotacional (Blumenau, Santa Catarina)....	43
Figura 14 – Processo de escorregamento translacional (Adaptado de Infanti Jr. e Fornasari Filho, 1998). ....	44
Figura 15 – Exemplo de escorregamento translacional (Blumenau, Santa Catarina). ....	45
Figura 16 – Processo de escorregamento em cunha (Adaptado de Infanti Jr. e Fornasari Filho, 1998). ....	46
Figura 17 – Exemplo de escorregamento em cunha (Blumenau, Santa Catarina)....	47

Figura 18 – Exemplo de movimentos complexos ocorridos no Morro do Baú em Santa Catarina.....	48
Figura 19 – Exemplo de movimentos complexos ocorridos em Blumenau, Santa Catarina.....	49
Figura 20 – Exemplo de movimentos complexos ocorridos em Blumenau, Santa Catarina.....	49
Figura 21 – Tipos de estudos possíveis de serem realizados em estudos de movimentos de massa gravitacionais (AMARAL JR., 2007).....	50
Figura 22 - Classificação simplificada de metodologias de avaliação de eventos perigosos para escorregamentos (adaptado de ALEOTTI E CHOWDHURY, 1999).	58
Figura 23 - Discretização de uma massa em ruptura (CHEN et al. 2003). .....	74
Figura 24 - Perspectiva em plano da topografia de um escorregamento (HOVLAND, 1977).....	75
Figura 25 - Perspectivas em plano e em seções de um escorregamento (HOVLAND, 1977).....	76
Figura 26 - Perspectivas em planta e em seções de uma coluna de solo (HOVLAND, 1977).....	77
Figura 27 - Perspectiva tridimensional de uma coluna de solo (HOVLAND, 1977). .	78
Figura 28 - Perspectiva 3D de parte da superfície de ruptura de uma coluna de solo (HOVLAND, 1977).....	79
Figura 29 - Comportamento da frente de saturação com o tempo para as três fases. (Adaptado de EPA, 1998).....	84
Figura 30 – Curva de infiltração.....	85
Figura 31 - Esquema das variáveis utilizadas no modelo hidrológico de Montgomery e Dietrich (1994). .....	97
Figura 32 – Exemplo de resultado gerado pelo SHALSTAB. A legenda indica as classes de estabilidade obtidas pelo cálculo do modelo (FERNANDES et al., 2004). .....	99
Figura 33 - Malha em elementos finitos tridimensional do local de investigação (NG et al., 2001).....	101
Figura 34 - Representação do modelo de estabilidade de talude hidrológico integrado.....	103
Figura 35 - Apenas os dados referentes a superfície do terreno são disponíveis (XIE et al., 2004b).....	107

Figura 36 - A profundidade do contato solo-rocha é conhecida (XIE et al., 2004b).	108
Figura 37 - A profundidade referente ao nível de água é conhecida (XIE et al., 2004b).	109
Figura 38 - As informações sobre nível d'água e profundidade da rocha são disponíveis (XIE et al., 2004b).	111
Figura 39 - Área de estudo do trabalho de Xie et al. (2004b).	113
Figura 40 - Seis mapas de fator de segurança distribuídos ao longo do tempo (XIE et al., 2004b).	114
Figura 41 - A distribuição do tempo onde o fator de segurança é menor que um (XIE et al., 2004b).	115
Figura 42 - Visão conceitual do modelo de infiltração de Green-Ampt.	116
Figura 43 - Modelo 1: a superfície de ruptura se forma entre a frente de umedecimento e o nível d'água (XIE et al., 2007a).	118
Figura 44 - Modelo 2: a superfície de ruptura se forma entre a superfície do terreno e a frente de umedecimento (XIE et al., 2007a).	119
Figura 45 - Modelo 3: a superfície de ruptura se forma abaixo do nível d'água (XIE et al., 2007a).	120
Figura 46 - Modelo 4: a superfície de ruptura abaixo do nível d'água e a zona não saturada existe (XIE et al., 2007a).	121
Figura 47 - Distribuição de mapas de fator de segurança ao longo tempo (XIE et al., 2007a).	123
Figura 48 - Variação dos fatores de segurança 1D e 3D com a profundidade (XIE et al., 2007a).	124
Figura 49 - Fluxograma esquemático das atividades desenvolvidas.	126
Figura 50 - Exemplo de uma curva $\theta$ x z gerada pelo modelo HYDRUS 1D.	132
Figura 51 - Visualização 3-D de uma coluna de solo (adaptado de HOVLAND, 1977).	135
Figura 52 - Visão tridimensional da porção inferior da superfície de ruptura da coluna de solo (XIE, 2003 adaptado de HOVLAND, 1977).	136
Figura 53 - Localização da área de estudo. A região rachurada em vermelho corresponde a área de estudo.	142
Figura 54 - Visão geral do relevo da região em que está inserida a área de estudo (fotografia aérea de 1973, escala 1:10.000).	143
Figura 55 - Carta de declividade.	147

Figura 56 – Carta de direção das vertentes.....	149
Figura 57 - Exemplo de perfil típico da Unidade U1 (AHRENDT, 2005).....	156
Figura 58 - Exemplo de perfil típico da Unidade U2 (AHRENDT, 2005).....	157
Figura 59 - Perfil representativo das unidades U5 e U5a (AHRENDT, 2005).....	161
Figura 60 - Exemplo de perfil típico da unidade U7 (AHRENDT, 2005).....	163
Figura 61 - Exemplo de perfil típico da Unidade U9 (AHRENDT, 2005).....	165
Figura 62 - Exemplo de perfil típico da Unidade U10 (AHRENDT, 2005).....	166
Figura 63 – Mapa de Unidades de materiais inconsolidados.....	167
Figura 64 - Valores médios de precipitação (máximos e mínimos) mensais medidos a partir de 1937 (adaptado de AHRENDT, 2005). ....	169
Figura 65 – Localização das oito encostas selecionadas para a aplicação da metodologia proposta. ....	172
Figura 66 – Visualização da região da área D. ....	172
Figura 67 – Visualização da região da área F. ....	173
Figura 68 - Visualização da região da área H.....	173
Figura 69 – Probabilidade de ocorrência de um evento semelhante ao de 5 de fevereiro de 2001 ao longo dos anos.....	178
Figura 70 - Probabilidade de ocorrência de um evento semelhante ao de 13-14 de outubro de 1995 ao longo dos anos. ....	180
Figura 71 - Umidade volumétrica x Profundidade (cm). Unidade 6a - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	181
Figura 72 - Umidade volumétrica x Profundidade (cm). Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	182
Figura 73 - Infiltração (cm/min) x Tempo (min). Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	184
Figura 74 - Infiltração (cm/min) x Tempo (min). Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	185
Figura 75 – Infiltração acumulada (cm) x Tempo (min). Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	186
Figura 76 - Infiltração acumulada (cm) x Tempo (min). Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	186
Figura 77 – Tensão de sucção (cm) x Tempo (min). Unidade 4 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	187

Figura 78 - Tensão de sucção (cm) x Tempo (min). Unidade 7 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	188
Figura 79 – Infiltração (cm/min) x Tempo (min). Unidade 7 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	189
Figura 80 – Infiltração acumulada (cm) x Tempo (min). Unidade 7 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	189
Figura 81 – Armazenamento de água no solo (cm) x Tempo (min). Unidade 8 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	190
Figura 82 – Mapa de Fator de Segurança 3D para o evento de 5 de fevereiro de 2001. ....	211
Figura 83 - Mapa de Fator de Segurança 3D para o evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	213
Figura 84 - Unidade 1 - evento de 5 de fevereiro de 2001 .....	260
Figura 85 - Unidade 2 - evento de 5 de fevereiro de 2001. ....	260
Figura 86 - Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001. ....	261
Figura 87 - Unidade 4 - evento de 5 de fevereiro de 2001. ....	261
Figura 88 - Unidade 5a - evento de 5 de fevereiro de 2001. ....	262
Figura 89 - Unidade 6 - evento de 5 de fevereiro de 2001. ....	262
Figura 90 - Unidade 6a - evento de 5 de fevereiro de 2001. ....	263
Figura 91 - Unidade 7 - evento de 5 de fevereiro de 2001. ....	263
Figura 92 - Unidade 8 - evento de 5 de fevereiro de 2001. ....	264
Figura 93 - Unidade 9 - evento de 5 de fevereiro de 2001. ....	264
Figura 94 - Unidade 10 - evento de 5 de fevereiro de 2001. ....	265
Figura 95 - Unidade 1 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	268
Figura 96 - Unidade 2 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	268
Figura 97 - Unidade 3 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	269
Figura 98 - Unidade 4 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	269
Figura 99 - Unidade 5a - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	270
Figura 100 - Unidade 6 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	270
Figura 101 - Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	271
Figura 102 - Unidade 7 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	271
Figura 103 - Unidade 8 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	272
Figura 104 - Unidade 9 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	272
Figura 105 - Unidade 10 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	273

Figura 106 – Unidade 1 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	276
Figura 107 - Unidade 1 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	276
Figura 108 - Unidade 2 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	277
Figura 109 Unidade 2 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	277
Figura 110 - Unidade 3 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	278
Figura 111 - Unidade 3 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	278
Figura 112 - Unidade 4 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	279
Figura 113 - Unidade 4 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	279
Figura 114 - Unidade 5a – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	280
Figura 115 - Unidade 5a – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	280
Figura 116 - Unidade 6 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	281
Figura 117 - Unidade 6 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	281
Figura 118 - Unidade 6a – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	282
Figura 119 - Unidade 6a – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	282
Figura 120 - Unidade 7 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	283
Figura 121 - Unidade 7 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	283
Figura 122 - Unidade 8 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	284
Figura 123 - Unidade 8 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	284
Figura 124 - Unidade 9 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	285
Figura 125 - Unidade 9 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	285
Figura 126 - Unidade 10 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	286
Figura 127 - Unidade 10 – evento de 5 de fevereiro de 2001.....	286
Figura 128 - Unidade 1 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	288
Figura 129 - Unidade 1 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	288
Figura 130 - Unidade 2 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	289
Figura 131 - Unidade 2 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	289
Figura 132 - Unidade 3 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	290
Figura 133 - Unidade 3 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	290
Figura 134 - Unidade 4 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	291
Figura 135 - Unidade 4 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	291
Figura 136 - Unidade 5a – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	292
Figura 137 - Unidade 5a – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	292
Figura 138 - Unidade 6 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	293
Figura 139 - Unidade 6 – evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	293

Figura 140 - Unidade 6a – evento de 13-14 de outubro de 1995.....	294
Figura 141 - Unidade 6a – evento de 13-14 de outubro de 1995.....	294
Figura 142 - Unidade 7 – evento de 13-14 de outubro de 1995.....	295
Figura 143 - Unidade 7 – evento de 13-14 de outubro de 1995.....	295
Figura 144 - Unidade 8 – evento de 13-14 de outubro de 1995.....	296
Figura 145 - Unidade 8 – evento de 13-14 de outubro de 1995.....	296
Figura 146 - Unidade 9 – evento de 13-14 de outubro de 1995.....	297
Figura 147 - Unidade 9 – evento de 13-14 de outubro de 1995.....	297
Figura 148 - Unidade 10 – evento de 13-14 de outubro de 1995.....	298
Figura 149 - Unidade 10 – evento de 13-14 de outubro de 1995.....	298
Figura 150 - Unidade 1 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	300
Figura 151 - Unidade 2 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	300
Figura 152 - Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	301
Figura 153 - Unidade 4 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	301
Figura 154 - Unidade 5a - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	302
Figura 155 - Unidade 6 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	302
Figura 156 - Unidade 6a - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	303
Figura 157 - Unidade 7 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	303
Figura 158 - Unidade 8 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	304
Figura 159 - Unidade 9 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	304
Figura 160 - Unidade 10 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	305
Figura 161 - Unidade 1 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	308
Figura 162 - Unidade 2 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	308
Figura 163 - Unidade 3 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	309
Figura 164 - Unidade 4 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	309
Figura 165 - Unidade 5a - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	310
Figura 166 - Unidade 6 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	310
Figura 167 - Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	311
Figura 168 - Unidade 7 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	311
Figura 169 - Unidade 8 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	312
Figura 170 - Unidade 9 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	312
Figura 171 - Unidade 10 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	313
Figura 172 - Unidade 1 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	316
Figura 173 - Unidade 1 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	316

Figura 174 - Unidade 2 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	317
Figura 175 - Unidade 2 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	317
Figura 176 - Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	318
Figura 177 - Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	318
Figura 178 - Unidade 4 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	319
Figura 179 - Unidade 4 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	319
Figura 180 - Unidade 5a - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	320
Figura 181 - Unidade 5a - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	320
Figura 182 - Unidade 6 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	321
Figura 183 - Unidade 6 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	321
Figura 184 - Unidade 6a - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	322
Figura 185 - Unidade 6a - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	322
Figura 186 - Unidade 7 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	323
Figura 187 - Unidade 7 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	323
Figura 188 - Unidade 8 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	324
Figura 189 - Unidade 8 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	324
Figura 190 - Unidade 9 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	325
Figura 191 - Unidade 9 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	325
Figura 192 - Unidade 10 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	326
Figura 193 - Unidade 10 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	326
Figura 194 - Unidade 1 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	328
Figura 195 - Unidade 1 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	328
Figura 196 - Unidade 2 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	329
Figura 197 - Unidade 2 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	329
Figura 198 - Unidade 3 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	330
Figura 199 - Unidade 3 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	330
Figura 200 - Unidade 4 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	331
Figura 201 - Unidade 4 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	331
Figura 202 - Unidade 5a - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	332
Figura 203 - Unidade 5a - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	332
Figura 204 - Unidade 6 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	333
Figura 205 - Unidade 6 - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	333
Figura 206 - Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	334
Figura 207 - Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	334

Figura 208 - Unidade 7 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	335
Figura 209 - Unidade 7 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	335
Figura 210 - Unidade 8 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	336
Figura 211 - Unidade 8 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	336
Figura 212 - Unidade 9 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	337
Figura 213 - Unidade 9 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	337
Figura 214 - Unidade 10 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	338
Figura 215 - Unidade 10 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	338
Figura 216 - Unidade 1 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	340
Figura 217 - Unidade 2 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	340
Figura 218 - Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	341
Figura 219 - Unidade 4 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	341
Figura 220 - Unidade 5a - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	342
Figura 221 - Unidade 6 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	342
Figura 222 - Unidade 6a - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	343
Figura 223 - Unidade 7 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	343
Figura 224 - Unidade 8 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	344
Figura 225 - Unidade 9 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	344
Figura 226 - Unidade 10 - evento de 5 de fevereiro de 2001.....	345
Figura 227 - Unidade 1 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	348
Figura 228 - Unidade 2 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	348
Figura 229 - Unidade 3 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	349
Figura 230 - Unidade 4 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	349
Figura 231 - Unidade 5a - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	350
Figura 232 - Unidade 6 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	350
Figura 233 - Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	351
Figura 234 - Unidade 7 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	351
Figura 235 - Unidade 8 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	352
Figura 236 - Unidade 9 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	352
Figura 237 - Unidade 10 - evento de 13-14 de outubro de 1995.....	353

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de intervalo de valores para os parâmetros de magnitude para escorregamento. (OJEDA-MONCAYO et al., 2004) .....	57
Tabela 2 - Resumo dos métodos mais utilizados para análise de estabilidade de taludes e suas principais características (adaptado de HUNT, 1986). .....	63
Tabela 3 - Métodos de análise de estabilidade de talude tridimensional (DUNCAN, 1996).....	72
Tabela 4 - Principais equações de infiltração com base empírica. $i(t)$ é a infiltração e $I(t)$ é a infiltração acumulada.....	89
Tabela 5 - Classes de estabilidade definidas pelo SHALSTAB. ....	99
Tabela 6 - Sumário dos eventos de chuva simulados .....	101
Tabela 7 - Características gerais do perfil da unidade U1 (adaptado de AHRENDT, 2005).....	155
Tabela 8 - Características gerais do perfil da unidade U2 (adaptado de AHRENDT, 2005).....	157
Tabela 9 - Características gerais do perfil da unidade U3 (adaptado de AHRENDT, 2005).....	158
Tabela 10 - Características gerais do perfil da unidade U4 (adaptado de AHRENDT, 2005).....	159
Tabela 11 - Características gerais do perfil da unidade U5 (adaptado de AHRENDT, 2005).....	160
Tabela 12 - Características gerais do perfil da unidade U6 (adaptado de AHRENDT, 2005).....	162
Tabela 13 - Características gerais do perfil da unidade U7 (adaptado de AHRENDT, 2005).....	162
Tabela 14 - Características gerais do perfil da unidade U8 (adaptado de AHRENDT, 2005).....	164
Tabela 15 - Características gerais do perfil da unidade U9 (adaptado de AHRENDT, 2005).....	164
Tabela 16 - Características gerais do perfil da unidade U10 (adaptado de AHRENDT, 2005).....	166
Tabela 17 - Índices físicos dos materiais inconsolidados. ....	174

Tabela 18 - Condutividade hidráulica saturada e parâmetros de resistência dos materiais inconsolidados. ....	175
Tabela 19 - Parâmetros de Van Genuchten de cada material inconsolidado.....	176
Tabela 20 - Valores de precipitação (mm) do evento de 13-14 de outubro de 1995. ....	179
Tabela 21 - Valores de peso específico médio, coesão e ângulo de atrito que serão utilizados no cálculo do fator de segurança para o evento de 2001.....	191
Tabela 22 - Valores de peso específico médio, coesão e ângulo de atrito que serão utilizados no cálculo do fator de segurança para o evento de 1995.....	193
Tabela 23 – Fator de segurança 3D da área A .....	197
Tabela 24 - Fator de segurança 3D da área B. ....	199
Tabela 25 - Fator de segurança 3D da área C. ....	200
Tabela 26 - Fator de segurança 3D da área D. ....	202
Tabela 27 - Fator de segurança 3D da área E. ....	203
Tabela 28 - Fator de segurança 3D da área F. ....	204
Tabela 29 - Fator de segurança 3D da área G.....	205
Tabela 30 - Fator de segurança 3D da área H. ....	206
Tabela 31 - Fator de segurança tridimensional das áreas de estudo.....	209
Tabela 32 – Análise da área D apresentando o resultado de três valores diferentes de FS para cada cenário. ....	216
Tabela 33 – Média e desvio padrão dos valores de $\alpha$ , $\beta$ e FS das áreas estudadas. ....	221

# SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>33</b>
<b>2.1.</b>	<b>Movimentos de Massa Gravitacionais .....</b>	<b>33</b>
2.1.1.	Quedas .....	33
2.1.2.	Tombamento.....	35
2.1.3.	Escoamento.....	36
2.1.4.	Expansão lateral .....	40
2.1.5.	Escorregamento.....	41
2.1.5.1.	Escorregamentos rotacionais .....	42
2.1.5.2.	Escorregamentos translacionais.....	43
2.1.5.3.	Escorregamentos em cunha .....	46
2.1.6.	Movimentos complexos .....	47
<b>2.2.</b>	<b>Tipos de Estudo.....</b>	<b>50</b>
2.2.1.	Carta de inventário.....	50
2.2.2.	Carta de zoneamento .....	51
2.2.3.	Carta de hazard .....	52
2.2.4.	Carta de risco .....	53
2.2.5.	Carta de procedimentos.....	54
<b>2.3.</b>	<b>Hazard.....</b>	<b>54</b>
2.3.1.	Parâmetros de magnitude.....	55
<b>2.4.</b>	<b>Classificação das Metodologias.....</b>	<b>57</b>
2.4.1.	Metodologias qualitativas.....	58
2.4.1.1.	Análise geomorfológica de campo.....	59

2.4.1.2. Combinação qualitativa de mapas .....	59
2.4.2. Metodologias quantitativas .....	60
2.4.2.1. Análise estatística .....	60
2.4.2.1.1. Análise bivariada.....	61
2.4.2.1.2. Análise multivariada.....	61
2.4.2.2. Análise baseada em parâmetros geotécnicos.....	62
2.4.2.2.1. Análise determinística – Fator de Segurança .....	62
2.4.2.2.2. O fator de segurança (FS) .....	64
2.4.2.2.3. Métodos baseados em equilíbrio-limite.....	67
2.4.2.2.4. Análise probabilística .....	68
2.4.2.3. Análise por redes neurais .....	70
<b>2.5 Análise Tridimensional de Estabilidade de Talude .....</b>	<b>70</b>
2.5.1 Método de Hovland (1977).....	75
<b>2.6 Dinâmica da Água no Solo e a Estabilidade de Taludes .....</b>	<b>82</b>
2.6.1. Infiltração.....	83
2.6.2. Classificação dos modelos de infiltração.....	87
2.6.2.1. Equações empíricas .....	88
2.6.2.2. Equações com base física .....	89
2.6.2.2.1. Equação de Philip .....	89
2.6.2.2.2. Equação de Green-Ampt .....	90
2.6.2.2.3. Equação de Richards.....	92
<b>2.7 Combinação de Modelagem Hidrológica com Métodos de Cálculo de Fator de Segurança .....</b>	<b>93</b>
2.7.1 O modelo SHALSTAB (1998).....	95
2.7.2 O modelo de NG et al. (2001) .....	100
2.7.3 O modelo de Wilkinson et al. (2002) .....	102
2.7.4 O modelo de Xie et al. (2004b) .....	104

2.7.5	O modelo de Xie et al. (2007a).....	115
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>125</b>
<b>3.1</b>	<b>Etapa 1 – Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>127</b>
<b>3.2</b>	<b>Etapa 2 – Caracterização Básica da Área de Estudo.....</b>	<b>127</b>
<b>3.3</b>	<b>Etapa 3 – Caracterização dos Materiais Inconsolidados .....</b>	<b>127</b>
<b>3.4</b>	<b>Etapa 4 – Definição da(s) Superfície(s) de Ruptura Potencial(s). 128</b>	
<b>3.5</b>	<b>Etapa 5 – Análise de Dados Pluviográficos .....</b>	<b>128</b>
<b>3.6</b>	<b>Etapa 6 – Modelo de Infiltração .....</b>	<b>129</b>
<b>3.7</b>	<b>Etapa 7 – Determinação do Peso Específico Médio .....</b>	<b>132</b>
<b>3.8</b>	<b>Etapa 8 – Obtenção dos Valores de Parâmetros de Resistência 133</b>	
<b>3.9</b>	<b>Etapa 9 – Definição do Tamanho dos Grids Regulares e Caracterização Detalhada da Área de Estudo .....</b>	<b>134</b>
<b>3.10</b>	<b>Etapa 10 – Fator de Segurança Tridimensional (FS<sub>3D</sub>) .....</b>	<b>134</b>
<b>3.10.1</b>	<b>Fator de segurança tridimensional e modelo hidrológico .....</b>	<b>138</b>
<b>3.11</b>	<b>Etapa 11 – Análise de Resultados.....</b>	<b>139</b>
<b>3.12</b>	<b>Etapa 12 – Elaboração da Dissertação .....</b>	<b>140</b>
<b>4</b>	<b>CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA .....</b>	<b>141</b>
<b>4.1</b>	<b>Aspectos Gerais .....</b>	<b>141</b>
4.1.1	Localização.....	141
4.1.2	Geologia .....	143
4.1.3	Relevo .....	144
4.1.4	Aspectos climáticos .....	145
<b>4.2</b>	<b>Documentos Cartográficos Básicos .....</b>	<b>145</b>
4.2.1	Mapa topográfico .....	145
4.2.2	Carta de declividade.....	146
4.2.3	Carta de direção das vertentes.....	146
<b>4.3</b>	<b>Materiais Inconsolidados .....</b>	<b>151</b>

4.3.1	Descrição sucinta dos tipos de materiais inconsolidados.....	151
4.3.1.1	Materiais inconsolidados de origem residual .....	152
4.3.1.2	Materiais inconsolidados de aterro .....	153
4.3.1.3	Materiais inconsolidados de origem aluvionar .....	154
4.3.2	Unidades de Materiais Inconsolidados.....	154
4.3.2.1	Unidade U1 .....	155
4.3.2.2	Unidade U2 .....	156
4.3.2.3	Unidade U3.....	158
4.3.2.4	Unidade U4.....	158
4.3.2.5	Unidade U5.....	159
4.3.2.6	Unidade U5a.....	160
4.3.2.7	Unidade U6.....	161
4.3.2.8	Unidade U6a.....	162
4.3.2.9	Unidade U7 .....	162
4.3.2.10	Unidade 8 .....	163
4.3.2.11	Unidade 9 .....	164
4.3.2.12	Unidade 10 .....	165
4.3.3	Mapa de Materiais Inconsolidados.....	166
<b>4.4</b>	<b>Pluviosidade .....</b>	<b>169</b>
<b>5.</b>	<b>APLICAÇÃO EM CAMPOS DO JORDÃO .....</b>	<b>171</b>
<b>5.1</b>	<b>Dados Pluviográficos.....</b>	<b>177</b>
5.1.1	Evento de 5 de fevereiro de 2001 .....	177
5.1.2	Evento de 13-14 de outubro de 1995.....	178
<b>5.2</b>	<b>HYDRUS-1D .....</b>	<b>180</b>
5.2.1	Umidade volumétrica x Profundidade (cm) .....	181
5.2.2	Infiltração (cm/min) x Tempo (min) e Infiltração acumulada (cm) x Tempo (min) .....	184

5.2.3	Tensão de sucção (cm) x Tempo (min) .....	187
5.2.4	Fluxo <i>run-off</i> (cm/min) x Tempo (min) e Fluxo <i>run-off</i> acumulado (cm) x Tempo (min).....	188
5.2.5	Armazenamento de água no solo (cm) x Tempo (min).....	189
5.2.6	Umidade volumétrica média ( $\theta_M$ ) e umidade volumétrica na profundidade z ( $\theta(z)$ ) .....	190
<b>5.3</b>	<b>Obtenção do Fator de Segurança 3D.....</b>	<b>195</b>
<b>6.</b>	<b>ANÁLISES.....</b>	<b>215</b>
<b>6.1</b>	<b>Quanto à Qualidade dos Dados Pré-existentes .....</b>	<b>215</b>
<b>6.2</b>	<b>Quanto a Variabilidade dos Dados.....</b>	<b>215</b>
<b>6.3</b>	<b>Quanto aos Valores de FS3D a Partir da Média dos Parâmetros</b>	<b>216</b>
<b>6.4</b>	<b>Quanto a Delimitação das Áreas de Ruptura Potenciais .....</b>	<b>217</b>
<b>6.5</b>	<b>Quanto as Superfícies de Ruptura Potenciais .....</b>	<b>218</b>
<b>6.6</b>	<b>Quanto a Relação <math>\theta</math> x Profundidade .....</b>	<b>218</b>
<b>6.7</b>	<b>Quanto a Previsão Temporal .....</b>	<b>219</b>
<b>6.8</b>	<b>Quanto ao Resultado do FS<sub>3D</sub>.....</b>	<b>220</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>223</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>227</b>
	<b>APÊNDICE I – Gráficos de umidade volumétrica x profundidade (cm) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 5 de fevereiro de 2001. ....</b>	<b>259</b>
	<b>APÊNDICE II – Gráficos de umidade volumétrica x profundidade (cm) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 13-14 de outubro de 1995.....</b>	<b>267</b>
	<b>APÊNDICE III – Gráficos de infiltração (cm/min) x tempo (min) e infiltração acumulada (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 05 de fevereiro de 2001. ....</b>	<b>275</b>

<b>APÊNDICE IV</b> – Gráficos de infiltração (cm/min) x tempo (min) e infiltração acumulada (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 13-14 de outubro de 1995.....	<b>287</b>
<b>APÊNDICE V</b> – Gráficos de tensão de sucção (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 5 de fevereiro de 2001. ....	<b>299</b>
<b>APÊNDICE VI</b> – Gráficos de tensão de sucção (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 13-14 de outubro de 1995. ....	<b>307</b>
<b>APÊNDICE VII</b> – Gráficos de fluxo <i>run-off</i> (cm/min) x tempo (min) e fluxo <i>run-off</i> acumulado (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 5 de fevereiro de 2001. ....	<b>315</b>
<b>APÊNDICE VIII</b> – Gráficos de fluxo <i>run-off</i> (cm/min) x tempo (min) e fluxo <i>run-off</i> acumulado (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 13-14 de outubro de 1995.....	<b>327</b>
<b>APÊNDICE IX</b> – Gráficos de armazenamento de água no solo (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 5 de fevereiro de 2001.....	<b>339</b>
<b>APÊNDICE X</b> – Gráficos de armazenamento de água no solo (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 13-14 de outubro de 1995.....	<b>347</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Os estudos de previsão de ocorrência de eventos de processos naturais e/ou induzidos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos no sentido de propiciar a sociedade informação que permita a tomada de decisão e a adoção de medidas preventivas, de controle e proteção.

No caso dos movimentos de massa gravitacionais os estudos de previsão vêm sendo desenvolvidos a partir de três vertentes, a saber: de informações relativas aos deflagradores, das condições predisponentes e de correntes de monitoramento. Todas estas vertentes apresentam limitações, ora no aspecto temporal ora no espacial, ou em ambos.

No que tange aos procedimentos relativos aos componentes do meio físico (materiais inconsolidados, relevo, rocha) tem sido utilizados os modelos geotécnicos predominantemente determinísticos e muito esparsos os de caráter probabilísticos.

Dentre os modelos utilizados que vem sendo utilizados existe o uso do Fator de Segurança 3D (condição de equilíbrio limite) com variantes diversas. Neste estudo busca-se o desenvolvimento de um procedimento que combina os aspectos da superfície de ruptura em 3D com as condições de chuvas e as condições de infiltração. Este conjunto foi aplicado às superfícies pré-definidas a partir do mapa de materiais inconsolidados, para áreas delimitadas a partir da classificação geomórfica das encostas.

Este estudo justifica-se, portanto na tentativa científica de buscar um conjunto de procedimentos que permitam a previsão de escorregamentos a partir de resultados de mapeamento geotécnicos em escalas maiores que 1:10.000.

A região escolhida para a aplicação do conjunto de procedimentos é parte da cidade de Campos do Jordão, por ser palco de escorregamentos e por ter dados resultantes de um mapeamento geotécnico realizado em escala 1:2.000.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar concisamente tópicos relevantes relacionados ao trabalho, desde a teoria à sua aplicação, tais como: descrição dos tipos de movimentos de massa gravitacionais, os tipos de estudos que podem ser realizados, o conceito de *hazard*, as metodologias existentes para a avaliação do *hazard*, a análise tridimensional de estabilidade de talude e a dinâmica da água no solo.

### 2.1. Movimentos de Massa Gravitacionais

A classificação aqui apresentada é a adotada pela Associação Internacional de Geologia de Engenharia (IAEG) juntamente com a UNESCO (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura) em 1994. Os movimentos de massa gravitacionais são descritos e conseqüentemente classificados basicamente em função da forma do plano de ruptura, do tipo do material envolvido e da velocidade do movimento tal como serão descritos a seguir. São considerados como movimento de massa gravitacional: quedas (*falls*), tombamentos (*topples*), escoamentos (*flows*), escorregamentos (*slides*) e espalhamentos laterais (*lateral spreads*).

#### 2.1.1. Quedas

São movimentos de queda livre de materiais geológicos de um talude geralmente íngreme ou escarpa, sem a ocorrência de processos de cisalhamento (Figura 1 e Figura 2). Por se tratar de queda livre são processos de alta velocidade.

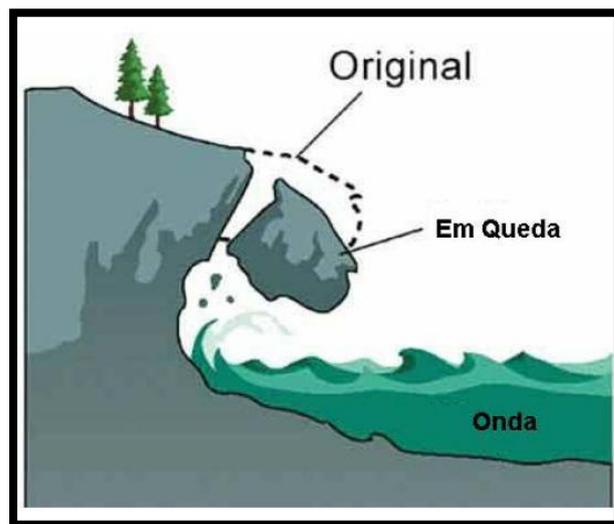


Figura 1 – Processo de queda provocada por ondas (Modificado de British Geological Survey, Fonte: <http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/gallery.jsp>).



Figura 2 – Exemplo de queda (Paraná, Brasil).

Quanto ao material envolvido as quedas são subdivididas em: queda de blocos rochosos (*rock fall*), queda de detritos ou solos grosseiros (*debris fall*, sendo 80% das partículas com diâmetros são maiores que 2mm) e queda de solos finos (*earth fall*, sendo 80% das partículas com diâmetros menores que 2mm).

### 2.1.2. Tombamento

Este tipo de movimento caracteriza-se pela rotação, sendo esta para dentro ou para fora da encosta, de uma unidade ou mais de blocos rochosos em torno de um ponto situado abaixo do centro de gravidade das mesmas, geralmente na base do bloco (Figura 3 e Figura 4). Esta força que gera o deslocamento é resultante da ação da gravidade, de forças aplicadas pelas unidades adjacentes ou de fluidos presentes nas descontinuidades. Este processo está condicionado à existência de descontinuidades subverticais no maciço e possui velocidade variada podendo ser um movimento bastante lento ou muito rápido e ocorre mais comumente em massas rochosas envolvendo até milhares de  $m^3$  de material.

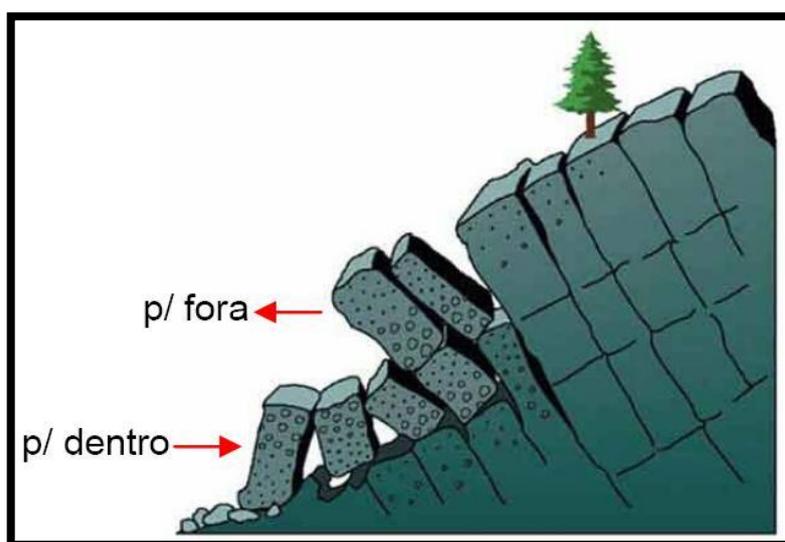


Figura 3 – Processo de tombamento (Modificado de British Geological Survey, Fonte: <http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/gallery.jsp>).



Figura 4 – Exemplo de tombamento (Bragança Paulista, SP).

### 2.1.3. Escoamento

Escoamentos incluem uma grande quantidade de movimentos com variações significativas em relação à velocidade e ao teor de umidade (WP/WLI, 1994). Os escoamentos ocorrem preferencialmente em materiais inconsolidados e com diferentes teores de umidade, desde materiais secos a materiais com umidade próxima ao limite de liquidez, mas também podem ocorrer em materiais rochosos. São conhecidos como processos de escoamento os eventos de rastejo, corrida, fluxo e avalanche.

Os rastejos (*creeps*) são movimentos muito lentos (da ordem de cm/ano), sendo comumente identificados pela inclinação de elementos lineares como cercas, postes, trilhos, árvores, etc. (Figura 5 e Figura 6).

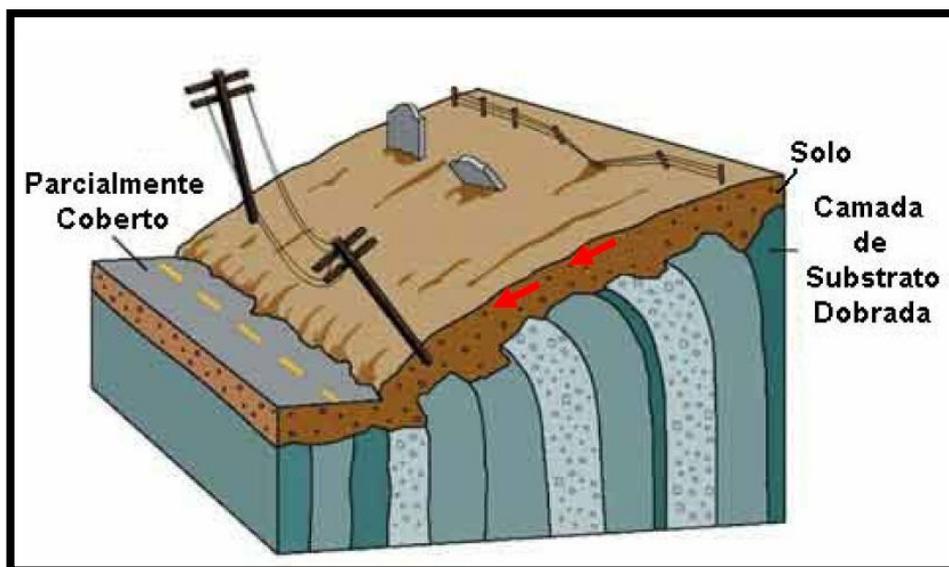


Figura 5 – Processo de rastejo (Modificado de British Geological Survey, Fonte: <http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/gallery.jsp>).



Figura 6 – Exemplo de rastejo e de evidência em campo (tronco de árvore torto) (Fontes: <http://ngdir.org/SiteLinks/Kids/Image/erathquake%20-en/glossary/creep-mm.jpg> e <http://geology.about.com/od/naturalhazardsclimate/ig/Landslides/treecreep.htm>).

As corridas e os fluxos (Figura 7 e Figura 8) são processos muito semelhantes, pois ambos se caracterizam pela velocidade do movimento, são escoamentos rápidos e pelo teor de água elevado. Estes movimentos possuem uma dinâmica híbrida regida pela mecânica dos sólidos e dos fluidos. Nas corridas o tipo

de material geológico mais comum são os detritos e os fluxos são escoamentos que possuem a forma de lóbulos.

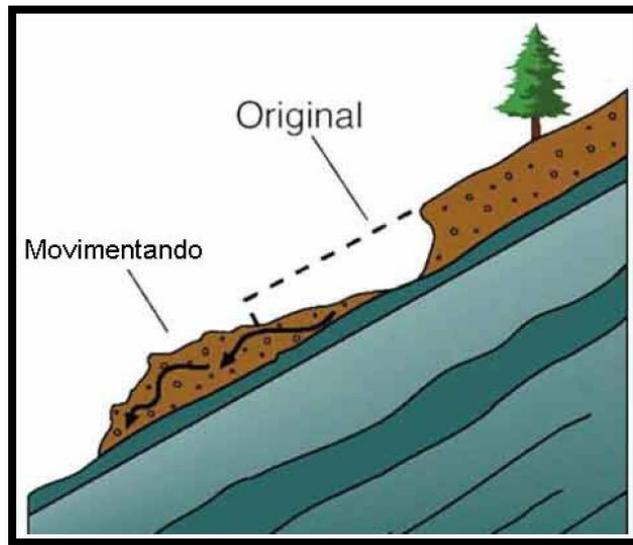


Figura 7 – Processo de fluxo (Modificado de British Geological Survey, Fonte: <http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/gallery.jsp>).



Figura 8 – Exemplo de fluxo de detritos (Blumenau, Santa Catarina).

As principais características morfológicas de avalanches são a forma de movimento, o teor de água-livre na cobertura de neve, a localização de um limite inferior de fluxo, geometria do percurso, e o tipo de ruptura da cobertura de neve (HOPFINGER, 1983). Ou seja, são processos característicos de ambientes de clima temperado e ocorrem em materiais geológicos de diferentes granulometrias (Figura 9).



Figura 9 – Exemplo de avalanche (Alpes) (Fonte: <http://www.alpine-guides.com/images/ski%20avalanche%20safety.jpg> ).

#### **2.1.4. Expansão lateral**

O movimento predominante neste tipo de processo é o espalhamento (dilatação ou expansão) lateral do material geológico, resultante de fraturas de cisalhamento ou tração. Este movimento caracteriza-se pela ruptura e espalhamento lateral de materiais coerentes (solos e rochas) que se encontram sobrejacentes a materiais que sofreram perda de resistência e ruptura repentina (colapso), resultando em uma baixíssima resistência, ainda que temporária, da superfície de contato dos materiais. O material geológico sobrejacente pode sofrer diversos tipos de movimentos: rotação, translação, escoamento, desintegração e subsidência, (Figura 10 e Figura 11).

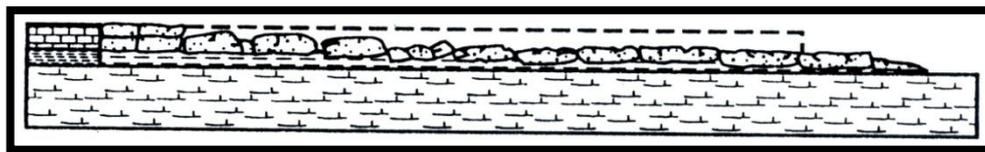


Figura 10 – Processo de expansão lateral (Adaptado de Varnes, 1978).



Figura 11 – Exemplo de expansão lateral (Cidade de Manzanillo, México) (Fonte: [http://research.eerc.berkeley.edu/projects/GEER/GEER\\_Post%20EQ%20Reports/Tecoman\\_2003/c-land.html](http://research.eerc.berkeley.edu/projects/GEER/GEER_Post%20EQ%20Reports/Tecoman_2003/c-land.html)).

### 2.1.5. Escorregamento

Os escorregamentos são processos determinantes na evolução das encostas, caracterizando-se por movimentos rápidos (geralmente metros por hora a metros por segundo), com superfície de ruptura bem definida (limites laterais e profundidade). Os escorregamentos podem ser divididos com base na forma do plano de ruptura e no tipo de material em movimento. Quanto à forma do plano de ruptura os escorregamentos são classificados em translacionais ou planares, rotacionais ou circulares e em cunha. Em relação ao material movimentado o mesmo pode ser constituído por material inconsolidado ou rocha.

Classicamente os escorregamentos em materiais inconsolidados são subdivididos em escorregamentos rotacionais e translacionais. O terceiro tipo de escorregamento (em cunha) ocorre em materiais rochosos, rochas alteradas e saprolitos.

#### 2.1.5.1. Escorregamentos rotacionais

Nos escorregamentos rotacionais o material geológico movimentado não é muito deformado e, em geral, ocorre em perfis mais homogêneos. A superfície de ruptura deste tipo de movimento é curva com a concavidade virada para cima e é ao longo desta superfície que o material se movimenta rotacionalmente (Figura 12 e Figura 13). Sendo bastante comum neste tipo de escorregamento a ocorrência de sucessivas rupturas, sendo que as fissuras expostas após a movimentação são concêntricas em planta e côncavas na direção do movimento.

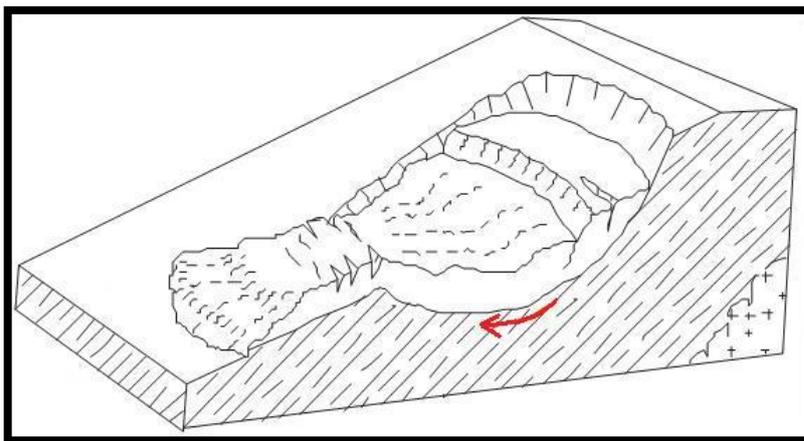


Figura 12 – Processo de deslizamento rotacional (Adaptado de Infanti Jr. e Fornasari Filho, 1998).



Figura 13 – Exemplo de deslizamento rotacional (Blumenau, Santa Catarina).

#### 2.1.5.2. Escorregamentos translacionais

Os deslizamentos translacionais se caracterizam por apresentarem uma superfície de ruptura com forma mais ou menos planar, acompanhando de forma geral as descontinuidades existentes nos materiais geológicos, seja elas mecânicas

e/ou hidrológicas (Figura 14 e Figura 15). O material mobilizado geralmente é mais deformado que no escorregamento rotacional.

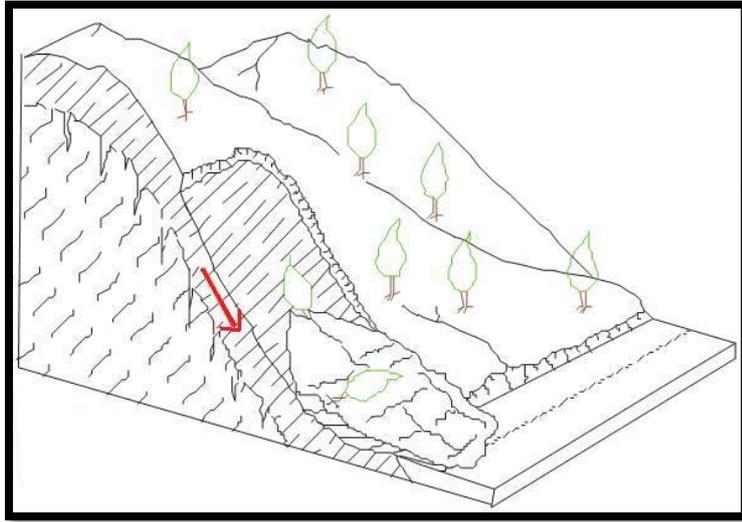


Figura 14 – Processo de escorregamento translacional (Adaptado de Infanti Jr. e Fornasari Filho, 1998).



Figura 15 – Exemplo de escorregamento translacional (Blumenau, Santa Catarina).

A geometria do escorregamento rotacional tende a reequilibrar a massa instável na altura do pé do talude, porque a superfície de deslizamento mergulha para dentro do mesmo, no escorregamento translacional o reequilíbrio só ocorre quando as forças atuantes diminuem em relação às resistentes.

A infiltração da água no solo representa o principal mecanismo de ruptura responsável pela ocorrência destes tipos de escorregamentos. Este tópico é amplamente discutido por diversos pesquisadores tais como Lacerda, 1989; Johnson e Sitar; 1990; Montgomery et al., 1997; Leroueil, 2001; Liritano et al., 1998; Gasmó et al., 2000; TSUKAMOTO et al., 2002; Al-Homoud et al., 1999; Wilkinson et al., 2002; Kim et al., 2004.

Não apenas a água infiltrada da chuva atua para a ocorrência de escorregamentos. Os fluxos de água de outras direções também influenciam este

processo, tais como, fluxos de água oriundos das fraturas do maciço rochoso encontrado em profundidade e também fluxos da distribuição progressiva entre as camadas com diferentes características de permeabilidade no maciço de materiais inconsolidados.

Basicamente a influência da água da chuva na ocorrência de escorregamentos pode ocorrer a partir de dois mecanismos: saturação pela base ou ascendente ou saturação pelo topo ou descendente.

#### 2.1.5.3. Escorregamentos em cunha

Os escorregamentos em cunha são típicos de maciços rochosos, onde ocorre a interseção de dois ou mais planos de ruptura (geralmente duas famílias de fratura) aumentando expressivamente o potencial de ruptura (Figura 16 e Figura 17).

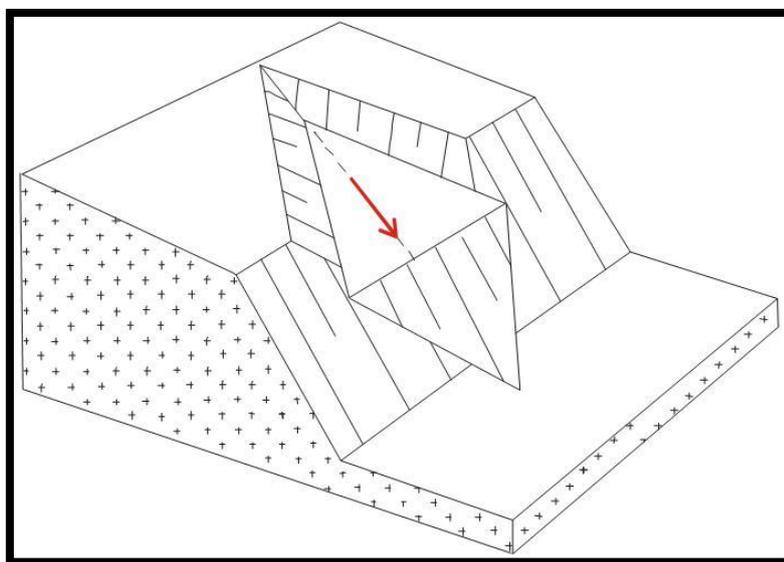


Figura 16 – Processo de escorregamento em cunha (Adaptado de Infanti Jr. e Fornasari Filho, 1998).



Figura 17 – Exemplo de escorregamento em cunha (Blumenau, Santa Catarina).

### **2.1.6. Movimentos complexos**

São combinações de dois ou mais diferentes tipos de movimentos descritos anteriormente. Os movimentos complexos são, inclusive, mais comuns do que qualquer tipo de movimento individual. As figuras a seguir apresentam exemplos de movimentos complexos.



Figura 18 – Exemplo de movimentos complexos ocorridos no Morro do Baú em Santa Catarina.



Figura 19 – Exemplo de movimentos complexos ocorridos em Blumenau, Santa Catarina.



Figura 20 – Exemplo de movimentos complexos ocorridos em Blumenau, Santa Catarina.

## 2.2. Tipos de Estudo

Diversos são os objetivos ao se estudar movimentos de massa gravitacionais e devido a isso uma simples hierarquização desses estudos quanto aos resultados obtidos auxilia no entendimento do grau de detalhamento de cada fase de trabalho. A Figura 21 de Amaral Jr. (2007) apresenta esta hierarquização.



Figura 21 – Tipos de estudos possíveis de serem realizados em estudos de movimentos de massa gravitacionais (AMARAL JR., 2007).

### 2.2.1. Carta de inventário

Escorregamentos são geralmente processos isolados que individualmente podem até não serem muito grandes, mas podem ocorrer com alta frequência em uma região (VAN WESTEN et al., 2006). O objetivo deste tipo de estudo é o de levantar, identificar e classificar cada feição encontrada em campo. É muito difícil se

ter um mapa de inventário que seja completo, tanto em respeito à área coberta quanto em relação ao período de tempo investigado (IBSEN e BRUNSDEN, 1996)

Este tipo de mapa apresenta os locais e delimitações das feições dos escorregamentos pretéritos, o tipo de escorregamento e o estado de atividade (CARRARA e MERENDA, 1976; HANSEN, 1984; WIECZOREK, 1984; EINSTEIN, 1988; SOETERS e VAN WESTEN, 1996). Um inventário é um banco de dados que pode apresentar um único evento, um evento regional, ou múltiplos eventos de escorregamentos. Mapas de pequena escala podem apresentar apenas as localizações dos eventos, contudo mapas de grande escala podem distinguir a partir dos depósitos as fontes dos escorregamentos e classificar diferentes tipos de escorregamentos além de apresentar outros dados pertinentes (USGS; PARISE, 2001).

### **2.2.2. Carta de zoneamento**

Os estudos de zoneamento estão voltados para a identificação das características geológico-geotécnicas (atributos) que influenciam a predisposição natural a movimentos de massa gravitacionais. A partir da análise destes atributos chega-se a individualização de áreas com mesmo nível de predisposição.

Segundo Soeters e Van Westen (1996) esta susceptibilidade expressa a probabilidade de um escorregamento vir a ocorrer em uma área com base nas condições locais do terreno. Fica-se claro, portanto, que a probabilidade temporal não é considerada.

Este tipo de mapa apresenta informação sobre as áreas do talude onde o movimento está mais predisposto a se iniciar classificando a estabilidade do talude de uma área em categorias que vão desde estável para instável. Na literatura a

maioria dos trabalhos apresentados tem por objetivo chegar a este tipo de mapas, tais como os trabalhos de: Baeza e Corominas, 1996, 2001; Baldelli et al., 1996; Fernandes et al., 2001; Dai e Lee, 2001; Lee et al., 2002, 2004; Clerice et al., 2002; Fernández, 2003; Tangestani, 2003; Ayalew et al., 2004; Ercanoglu et al., 2004; Süzen e Doyuran, 2004; Remondo et al., 2005; Schulz, 2005; Clerice et al., 2006; Havenith et al., 2006; Giraud e Shaw, 2007; Irigaray et al., 2007; Frattini et al., 2008; Yalcin, 2008; entre muitos outros.

### **2.2.3. Carta de hazard**

A carta de *hazard* (carta de eventos perigosos) para escorregamentos indica a possibilidade de um determinado evento ocorrer em uma dada área. Ou seja, na carta de *hazard* é realizada a análise da probabilidade espacial e temporal. É fundamental ainda que uma carta de *hazard* apresente ao usuário informações quanto a intensidade, probabilidade temporal, probabilidade espacial e os materiais geológicos envolvidos (ZUQUETTE e GANDOLFI, 2004).

Segundo o USGS (Unites States Geological Survey), uma carta de *hazard* pode ser simples como um mapa que utiliza os locais de escorregamentos passados para indicar uma instabilidade potencial, ou complexo como um mapa quantitativo que incorpora probabilidades baseada em variáveis como limites de chuva, declividade, tipo de solo e níveis de intensidade de terremotos.

Muitos autores já publicaram seus estudos sobre *hazard* contendo diferentes metodologias tais como: Carrara, 1983; Varnes, 1984; Hartlen e Viberg, 1988; Khawlie, 1994; Frangov et al., 1996; Mantovani et al., 1996; Aleotti e Chowdhury, 1999; Guzzetti et al., 1999, 2004, 2005; Van Westen et al., 1999; Parise, 2001; Mason e Rosenbaun, 2002; Pistocchi et al., 2001; Dai e Lee, 2003; Chau et al.,

2004; Xie et al., 2004, 2007; Liu et al., 2004; Remondo et al., 2005; Lee e Pradhan, 2006; Sarkar e Anbalagan, 2008; entre outros.

#### **2.2.4. Carta de risco**

O conceito de risco mais conhecido é o de Varnes (1984): a expectativa do número de vidas perdidas, pessoas feridas, danos a propriedades e interrupção da atividade econômica devido a um fenômeno danoso em uma dada área e período de referência. Portanto, a carta de risco representa a combinação entre as informações de probabilidade do mapa de *hazard* com a análise de todas as conseqüências possíveis (dano a propriedade, pessoas feridas, paralisação de serviços, etc.), expresso em unidade monetária por ano.

A avaliação dos riscos compreende a estimativa do grau de risco, decidindo onde é ou não aceitável para que na fase seguinte seja possível exercer um controle apropriado de medidas para reduzir o risco quando o nível de risco não é aceitável (HO et al., 2000).

Assim como para os estudos de susceptibilidade e *hazard* os estudos sobre avaliação de riscos também são bastante numerosos, tais como os de Bernknopf et al., 1988; Fell, 1994; Ragozin, 1994, 1996; Chowdhury, 1996; Einstein, 1997; Fell e Hartford, 1997; Leroi, 1997; Guzzetti et al., 2000, 2004; Dai et al., 2002; Chowdhury e Flentje, 2003; Bell e Glade, 2004; Chau et al., 2004; Van Westen et al., 2006; Kanungo et al., 2008; Magliulo et al., 2008, entre outros.

### 2.2.5. Carta de procedimentos

A carta de procedimentos é um documento voltado à orientação, para se evitar conseqüências ainda maiores do que os já causados por estes eventos naturais. Este é um instrumento fundamental no gerenciamento de risco.

## 2.3. Hazard

A origem da palavra “*hazard*” data do final do século 12 e vem do francês antigo *hasard* que significa “jogo de chances jogado com dados”, que possivelmente veio do espanhol *azar* “carta infeliz ou jogo de dados” que teve origem do Árabe *az-zahr* que significa “a morrer” (ONLINE ETYMOLOGY DICTIONARY). Portanto, observa-se que “*hazard*” sempre esteve relacionado com probabilidade, possibilidade e possuindo também uma conotação negativa, algo ruim.

Para as Geociências o conceito de *hazard* mais difundido e internacionalmente aceito é o de Varnes (1984) que diz que “um evento perigoso (*hazard*) é a probabilidade de ocorrer um fenômeno potencialmente danoso em uma dada área em um dado período de tempo”.

Esta definição incorpora os conceitos de localização espacial, a magnitude do evento e a freqüência de ocorrência. Qualquer sistema de previsão de eventos perigosos para escorregamentos deve responder a três questões chave: (1) a magnitude, (2) a localização e (3) o tempo de recorrência (GUZZETTI et al., 1999; XIE et al., 2007).

A probabilidade pode ser referente à probabilidade de ocorrência em um dado período, ou à probabilidade gerada devido à incerteza de parâmetros geotécnicos ou

de modelos geotécnicos, ou à frequência, intensidade, e duração de eventos deflagradores (CHOWDHURY e FLENTJE, 2002).

Zuquette (2004) destaca que o ponto central desse tipo de estudo é a obtenção da probabilidade de ocorrência de determinados eventos de magnitude/intensidade suficiente para classificá-los como perigosos. Ou seja, o que difere um evento comum de um evento perigoso é a intensidade do escorregamento. A questão é como expressar este parâmetro? Alguns estudos abordam esta questão (CROZIER e GLADE, 1999; EVANS, 2003; OJEDA-MONCAYO et al., 2004).

Ojeda-Moncayo et al. (2004) apresentam um conjunto de parâmetros de magnitude, pois entende-se que a avaliação de um escorregamento para ser considerado evento perigoso deve ser caracterizado através de alguns parâmetros (ou atributos de escorregamento).

### **2.3.1. Parâmetros de magnitude**

Os parâmetros identificados para uma melhor definição da magnitude de um escorregamento são: volume, velocidade, distância de *run out*, deformação, espessura da massa instável e área afetada.

O volume é um parâmetro geométrico que é estimado com base nas dimensões superficiais e na profundidade da massa mobilizada. Um guia para essas medidas é apresentado pela Comissão de Escorregamentos da IAEG (International Association of Engineering Geology) (WP/WLI, 1990).

Hungr (1981) afirma que a velocidade é a variável mais importante para a determinação da intensidade e propôs uma escala de poder de destruição de acordo com este parâmetro. A velocidade é uma medida de magnitude que deve ser expressa para um determinado tempo e para um determinado estágio de ruptura do

talude, considerado os estágios de ruptura descritos por Leroueil et al. (1996), Locat e Leroueil (1997) Leroueil (2001) e Vaunat e Leroueil (2002).

A distância de *run out* é está relacionada ao volume, litologia, tipo de material, potencial de energia e a morfologia. Para escorregamentos pretéritos esta medida pode ser obtida diretamente no campo ou através de análise de fotografias aéreas.

A espessura se refere ao valor médio da espessura da massa mobilizada. Nos casos onde não é possível realizar a medição direta ou não há evidência do plano de ruptura, deve ser feito análise da estabilidade do talude a fim de se obter a superfície crítica de ruptura.

O parâmetro de deformação se refere às mudanças de forma imediatas ou sazonais causadas pelo movimento do terreno. As deformações de massa podem ser qualificadas de acordo com a distorção da terra, continuidade no tempo e mudanças na superfície da topografia.

A extensão da área afetada por escorregamento em antigos escorregamentos pode ser obtido diretamente no campo, através de análise de fotografias aéreas, imagens de satélites ou mapas. Para taludes em estágio pré-ruptura, esta variável deve ser estimada através de aproximações empíricas com bases nos eventos passados.

Ojeda-Moncayo et al., (2004) apresenta ainda neste trabalho uma sugestão de intervalos de valores de magnitude para cada parâmetro citado (Tabela 1).

Tabela 1 - Exemplo de intervalo de valores para os parâmetros de magnitude para escorregamento. (OJEDA-MONCAYO et al., 2004)

Parâmetro	Intervalo de valores						
Volume (m <sup>3</sup> )	<< 10	10 - 10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>	> 10 <sup>6</sup>	
Velocidade (m/s)	<< 5x10 <sup>-10</sup>	5x10 <sup>-10</sup> - 5x10 <sup>-8</sup>	5x10 <sup>-8</sup> - 5x10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-6</sup> - 5x10 <sup>-4</sup>	5x10 <sup>-4</sup> - 5x10 <sup>-2</sup>	5x10 <sup>-10</sup> - 5x10 <sup>-8</sup>	> 5
Distância <i>run out</i> (Km)	<< 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup> - 10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup> - 10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup> - 10 <sup>0</sup>	> 10		
Espessura (m)	<< 1	1 - 12	12 - 25	25 - 35	35 - 50	> 50	
Área afetada (Km <sup>2</sup> )	<< 0.01	0.01 - 0.25	0.25 - 0.50	0.50 - 0.75	0.75 - 1	> 1	
Deformação	Heterogêneo	Homogêneo	Contínuo	Descontínuo			

## 2.4. Classificação das Metodologias

A avaliação de hazard e risco para escorregamentos é uma operação complexa que requer uma combinação de diferentes técnicas e metodologias, e a interação de vários especialistas, não apenas aos que pertencem as ciências da terra (HUNGR, 1997).

Os métodos de análise de estabilidade de taludes para elaboração de cartas de eventos perigosos relativos a escorregamentos podem ser basicamente divididos em dois grandes grupos: qualitativo e quantitativo. Os métodos qualitativos são considerados subjetivos devido a seus resultados serem baseados diretamente no julgamento/na experiência do especialista. Nos métodos quantitativos são geradas estimativas numéricas sobre a ocorrência dos eventos perigosos. Dentre cada um desses grupos de metodologias diferentes procedimentos e técnicas podem ser utilizados. A Figura 22 apresenta um enquadramento simplificado dessas metodologias.

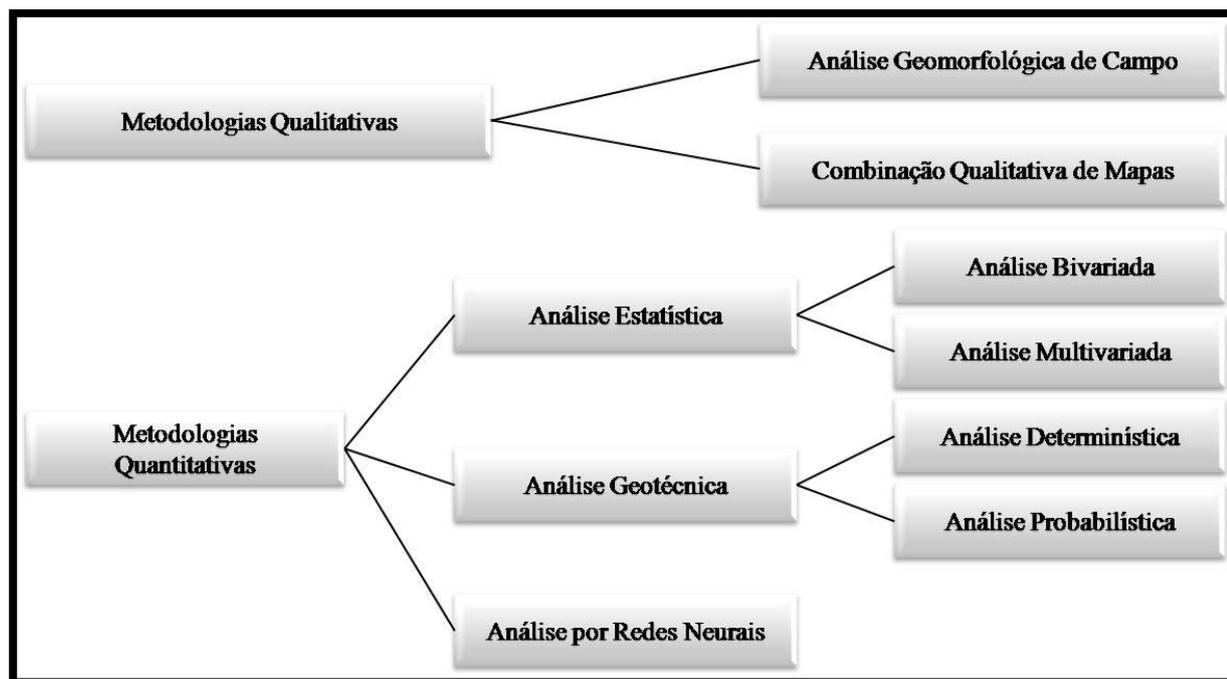


Figura 22 - Classificação simplificada de metodologias de avaliação de eventos perigosos para escorregamentos (adaptado de ALEOTTI E CHOWDHURY, 1999).

O tipo de análise utilizada em cada estudo irá depender em muito do tamanho da área estudada, da disponibilidade de tempo, da disponibilidade de dados existente e, sobretudo dos recursos financeiros disponíveis para a sua realização (AHRENDT, 2005).

#### 2.4.1. Metodologias qualitativas

Como pode ser observado na Figura 22 dentre as metodologias qualitativas se destacam dois tipos de análises: análise geomorfológica de campo e uso de índices ou mapas temáticos (combinação qualitativa de mapas). O que caracteriza estes métodos é que em ambos o resultado é em função fundamentalmente do julgamento do especialista. Nestas técnicas o evento perigoso é determinado a partir da combinação do mapeamento de movimentos de massa com as suas características geomorfológicas (AHRENDT, 2005).

#### 2.4.1.1. Análise geomorfológica de campo

Na análise geomorfológica de campo a avaliação do *hazard* é realizado diretamente no campo pelo pesquisador, baseado na sua experiência e conhecimento em das condições do terreno (VAN WESTEN et al., 1999).

Um exemplo deste tipo de análise foi apresentado em 1977 por Kienholz (apud HEGG e KIENHOLZ, 1995). Neste trabalho observa-se um método de mapeamento direto, onde o potencial evento perigoso é determinado em campo por geomorfólogos, este julgamento é feito com base na experiência individual do pesquisador e no uso da razão por analogia.

O trabalho mais conhecido que se utilizou desta técnica é o programa francês conhecido pela sigla ZERMOS (Zonas Expostas aos Riscos de Movimentos do Solo). Essa metodologia é aplicada às áreas instáveis e tem como finalidade básica fornecer informações das condições de instabilidade dos terrenos, sejam potenciais ou reais (HUMBERT, 1977).

Além deste, para a análise geomorfológica de campo têm-se como exemplo os trabalhos de Godefroy e Humbert, 1983; Kienholz et al., 1983, 1984; Bosi et al., 1985; Zimmerman et al., 1986; Seeley e West, 1990; Hansen et al., 1995.

#### 2.4.1.2. Combinação qualitativa de mapas

Na análise baseada na combinação ou sobreposição de mapas temáticos, o especialista deve conhecer os processos geomorfológicos atuantes naquela área selecionando e mapeando os fatores que ele julga afetar a estabilidade do talude (mapa litológico, carta de declividade, mapa estrutural, mapa do uso de terra, etc.), assim baseado em sua experiência ele atribui pesos de acordo com sua importância considerada em causar movimentos de massa.

A combinação qualitativa de mapas possui diversos exemplos de sua aplicação (NILSEN e BRABB, 1977; AMADESI e VIANELLO, 1978; STEVENSON, 1978; HOLLINGSWORTH e KOVACS, 1981; MEJÍA-NAVARRO et al., 1994; AYELEW e YAMAGISHI, 2005; LIU et al., 2004).

Em ambas as análises, a geomorfológica de campo e a combinação qualitativa de mapas, são técnicas auxiliadas por procedimentos de análise de terreno, onde a análise do produtos como fotografias aéreas e imagens de satélite são as principais ferramentas de análise (BRAND, 1988; MANTOVANI, 1996)

#### **2.4.2. Metodologias quantitativas**

As metodologias quantitativas possuem três categorias diferentes de análises: análise estatística, análise por parâmetros geotécnicos e análise por redes neurais, como apresentado na Figura 22.

##### **2.4.2.1. Análise estatística**

Primeiramente, na análise estatística um modelo estatístico é construído com a premissa de que os fatores que causaram a ruptura do talude na região serão os mesmos que irão causar escorregamentos no futuro (GUZZETTI et al., 1999).

Na análise estatística faz-se a comparação da distribuição espacial dos escorregamentos com os parâmetros que estão sendo considerados. Ou seja, neste tipo de análise o mapa de inventário dos escorregamentos constitui um documento essencial. A análise estatística pode ser dividida basicamente em dois métodos distintos de abordagem: a análise bivariada e a análise multivariada.

#### 2.4.2.1.1. Análise bivariada

Neste tipo de análise cada fator é comparado individualmente com o mapa de escorregamentos (mapa de inventário). O valor do peso de cada parâmetro é baseado na sua densidade em relação à quantidade dos escorregamentos. Os parâmetros considerados são litologia, declividade, altura do talude, uso da terra, densidade da drenagem, relevo, etc.. Este tipo de procedimento é bastante utilizado na análise de *hazard* e risco, principalmente por apresentarem a possibilidade de analisar áreas extensas.

#### 2.4.2.1.2. Análise multivariada

Um dos primeiros trabalhos apresentados que se utilizou desta técnica foi apresentado Carrara (1983, 1984) e Carrara et al., (1991). Todos os fatores relevantes são amostrados em uma malha baseado em unidades morfométricas. Para cada uma das unidades amostradas a presença ou ausência de escorregamentos é determinada. Os pesos dos fatores que controlam a ocorrência dos escorregamentos indicam a contribuição relativa de cada um desses fatores para o grau de *hazard* dentro da área definida. Para zonas homogêneas ou áreas com poucos tipos de processos de instabilidade esta técnica apresenta resultados bastante satisfatórios.

Diversos trabalhos utilizaram a análise estatística (bivariada e multivariada) para a avaliação *hazard* destacando os trabalhos de Neuland, 1976; Carrara, 1983; Roth, 1983; Carrara et al., 1991, 1995; Yin e Yan, 1988; Neeley e Rice, 1990; Mark, 1992; Van Westen, 1993, 1994; Chung et al., 1995; Baeza e Corominas, 1996, 2001; Van Westen, 1997; Chung e Fabbri, 1999; Guzzetti et al., 1999, 2005; Dai e Lee,

2001, 2003; Lee e Min, 2001; Clerice et al., 2002; Ayalew e Yamagishi, 2004; Ercanoglu et al., 2004; Lee, 2004; Lee et al., 2004; Süzen e Doyuran, 2004; Remondo et al., 2005; Davis et al., 2006; Komac, 2006; Havenith et al., 2006; Irigaray et al., 2007; Lee e Pradham, 2006; Frattini et al., 2008; Yalcin, 2008.

#### 2.4.2.2. Análise baseada em parâmetros geotécnicos

Na análise geotécnica os modelos são elaborados com base em entendimento de leis físicas (modelos físicos) que controlam a instabilidade do talude. Este tipo de análise é subdividido em: determinística e probabilística.

##### 2.4.2.2.1. Análise determinística – Fator de Segurança

Modelos determinísticos são baseados em leis físicas de conservação de massa, energia e momento. Os parâmetros utilizados nesses modelos podem ser determinados em campo ou em laboratório.

A análise determinística é baseada na análise da estabilidade do talude. As principais propriedades físicas são quantificadas e aplicadas em modelos matemáticos específicos e o fator de segurança é calculado. Em geral, para o cálculo do fator de segurança são necessários dados geométricos, parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito) e informações sobre pressão neutra e forças de percolação.

Os métodos de cálculo de estabilidade de taludes, apesar de serem criticados pela bibliografia por gerarem resultados muito localizados e lançarem mão de diversas premissas, são ainda os métodos mais utilizados pelos profissionais da área de geotécnica. Sua popularidade vem da simplicidade e facilidade de uso e ainda da grande experiência obtida de sua utilização (MOSTYN e SMALL, 1987).

Hunt (1986) apresenta os principais métodos de análise determinística, diferenciando-os entre a forma de ruptura e o tipo de material envolvido (homogêneo, não homogêneo e rocha). A Tabela 2 apresenta o resumo dos métodos mais utilizados e suas principais características.

Tabela 2 - Resumo dos métodos mais utilizados para análise de estabilidade de taludes e suas principais características (adaptado de HUNT, 1986).

Superfície de ruptura	Método	Premissas	Referências
<b>Planar e transcorrente</b>	Talude infinito	Inclinação constante e comprimento ilimitado	Taylor (1948)
	Culmann	Superfície de ruptura planar interceptando o topo e a base	Culmann (1866)
<b>Planar</b>	Cunha ou cunhas	Bloco deslizante ou bloco com forças laterais	Hoek e Bray (1977) Morgenstern (1968)
<b>Circular</b>	Fellenius	Forças laterais dos dois lados são iguais	Fellenius (1936)
	Círculo de atrito	Resultante atuando em arco de ruptura tangencial a um círculo concêntrico de raio R sem $\phi$	Taylor (1948)
	Bishop	Considera todas as forças atuando nas laterais das fatias	Bishop (1954)
	Bishop modificado	Sistema de forças simplificado	Bishop (1954)
	Spencer	Forças interfatias paralelas	Spencer (1967 e 1971)
<b>Irregular</b>	Morgenstern & Price	Baseado no sistema de forças de Bishop completo	Morgenstern e Price (1965)
	Jambu	Considera as forças interfatias	Jambu (1954 e 1971)

Apesar dos conceitos serem basicamente os mesmos, como as naturezas das hipóteses utilizadas para representar as forças internas da massa são diferentes, resultando em diferentes equações de fator de segurança (ESPINOZA et al., 1992).

#### 2.4.2.2.2. O fator de segurança (FS)

O fator de segurança (FS) consiste na relação entre as forças de resistência ao cisalhamento existente no solo e as de tensão cisalhante que atuam sobre ele que auxiliam a ruptura.

$$FS = \frac{\text{Forças resistentes}}{\text{Forças atuantes}} \quad \text{Eq.1}$$

A razão destas forças informa o grau de estabilidade de um talude e quando este é mínimo indica a superfície de ruptura crítica. O valor limite entre a condição estável e instável de um talude fisicamente é o valor 1,0 sendo que para  $FS \leq 1,0$  indica que o talude está instável ou na eminência de romper (fisicamente já teria rompido) e para  $FS > 1,0$  indica a condição de estabilidade.

De Mello (1979) afirma que o valor 1,0 não necessariamente indica a iminência de ruptura e sim, que o fator de segurança real é fortemente influenciado por características geológicas, de tensão-deformação, distribuição de poro-pressões, tensão inicial, entre outras.

Para Morgenstern (1995) o FS é o fator no qual os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo são reduzidos no intuito de trazer o talude para o estado de equilíbrio-limite ao longo da superfície de ruptura.

Os modelos determinísticos são comumente utilizados para áreas pequenas e/ou estudos de engenharia de estabilidade de talude específicos (WARD et al., 1981; WILSON e KEEFER, 1983; NASH, 1987; TERLIEN et al., 1995; JIBSON et al., 1998; JIBSON et al., 2000; COLLINS e ZNIDARCIC, 2004) e também são mais adequados em estudos em escala grande (1:2.000 - 1:10.000) (SOETERS E VAN WESTEN, 1996).

Os parâmetros envolvidos na análise de estabilidade de taludes são basicamente os parâmetros de resistência ao cisalhamento e a pressão neutra e as forças de percolação.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento são representados pela coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito interno ( $\Phi$ ) e estes variam de acordo com o tipo de material, condições hidrogeológicas, deformações atuantes e tempo de carregamento.

A obtenção destes parâmetros pode ser realizada através de ensaios de cisalhamento direto ou triaxial. Estes ensaios podem ser realizados de diferentes formas a depender das condições de deformação e de drenagem que se deseja avaliar.

Em solos em que a água infiltra com relativa facilidade, como a maioria dos solos residuais e colúvios, a condição de saturação em pequenas profundidades pode ser atingida rapidamente e por este motivo é mais apropriado obter os valores de resistência ao cisalhamento com o corpo de prova saturado (BRAND, 1982).

Segundo Ahrendt (2005) para elaboração de projeto de taludes o parâmetro sucção não é originalmente utilizado nos cálculos de estabilidade, pois representa um incremento na estabilidade do talude, aumentando indiretamente o coeficiente de

segurança do projeto, sendo consideradas para os cálculos sempre a pior condição que é a de saturação.

Porém, o crescente aumento do interesse na previsão de escorregamentos por métodos quantitativos principalmente nas análises que consideram a infiltração da água de chuva como agente deflagrador do evento, a influência da sucção na resistência ao cisalhamento é de suma importância. Neste caso a perda da sucção pode ocorrer repentinamente ainda durante o evento chuvoso e influenciar diretamente na ruptura do talude.

Contudo a obtenção da resistência ao cisalhamento levando em consideração a influência da sucção é bastante complexa principalmente quando relacionado a ensaios de cisalhamento. Alguns trabalhos apresentam o desenvolvimento deste tema e grandes avanços já foram realizados (FREDLUND, 1978; HO e FREDLUND, 1982; CHING et al., 1984; FREDLUND et al., 1995; RÖHM e VILLAR, 1995; VIERA, 1999; VANAPALLI e FREDLUND, 2000; REIS e VILAR, 2004)

Guidicini e Nieble (1983) apresentaram um estudo correlacionando índices pluviométricos e escorregamentos, e concluíram que as chuvas representam o aspecto mais significativo, distanciando-se dos demais fatores de importância, como causa de escorregamentos. Ahrendt (2005) diz que em taludes naturais, grande parte das instabilizações ocorre após períodos de chuva intensa ou estação chuvosa, demonstrando que a pluviosidade é, se não o parâmetro mais importante, o mais indispensável nas análises de estabilidade.

Além destes muitos outros autores apresentaram estudos específicos evidenciando a influência de alguns parâmetros hidrológicos nos escorregamentos de terra: 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); Avila et al. (2003); Lan et al. (2005); Ahrendt (2005); entre muitos outros.

Assim como já foi mencionado, para encostas naturalmente estáveis a instabilização está associada a perda de sucção, que é influenciada diretamente pelo aumento da umidade principalmente chegando próximo da saturação, reduzindo a sua resistência ao cisalhamento no plano de ruptura, podendo causar total perda de resistência dos solos. Além disso, o peso do material acima da superfície de ruptura é aumentado pela saturação completa ou parcial, aumentando assim as forças favoráveis à ruptura.

#### 2.4.2.2.3. Métodos baseados em equilíbrio-limite

Os métodos baseados na teoria do equilíbrio-limite para análise da estabilidade de taludes são amplamente utilizados e a experiência acumulada ao longo dos anos tem demonstrado que são, na sua maioria, rápidos, precisos e relativamente simples.

Apesar de cada método apresentar propósitos específicos, algumas hipóteses são comum a todos eles (MORGENSTERN e SANGREY, 1978):

- assume-se a existência de uma superfície de ruptura bem definida;
- assim como um critério de ruptura (geralmente Mohr-Coulomb), o qual é satisfeito ao longo de toda a superfície de ruptura;
- assume-se que a massa de solo ou rocha encontra-se no limite de equilíbrio e que a resistência ao cisalhamento do solo ou rocha pode ser mobilizada em qualquer ponto da superfície de ruptura;

- a resistência ao cisalhamento calculada e necessária para o equilíbrio é comparada com a resistência ao cisalhamento disponível. Esta comparação é feita a partir do fator de segurança.

- o mecanismo ou superfície de ruptura com o menor fator de segurança é encontrado através de iterações, e este é constante ao longo da superfície potencial de ruptura.

Hungr (1997) e Cavaunidis (1987) afirmam que por serem análises bidimensionais, os métodos que consideram o equilíbrio-limite resultam em valores subestimados em comparação com análises feitas tridimensionalmente. No entanto, Sancio (1997) aponta que a maioria dos métodos tridimensionais ainda não está pronta para propostas práticas, pois necessitam de sofisticados programas de computador e ainda um número muito grande de informações, e que os métodos bidimensionais já ultrapassaram esta barreira, sendo utilizados por programas simples e acessíveis com resultados bastante acurados.

Fazem parte deste tipo de métodos todos àqueles apresentados na Tabela 2.

#### 2.4.2.2.4. Análise probabilística

As análises probabilísticas ganharam nos últimos anos mais atenção para a avaliação do hazard para escorregamentos devido a levarem em consideração as incertezas e a variabilidade espacial dos parâmetros relacionados aos escorregamentos (CHUGH, 1984; MANKELOW e MURPHY, 1998; LUZI et al., 2000; CAPOLONGO et al., 2002; DEL GAUDIO e WASOWSKI, 2004; WANG et al., 2008).

A incerteza relacionada aos parâmetros de resistência do solo pode ser gerada tanto devido à variabilidade espacial das características do solo *in situ* como

devido a erros em ensaios laboratoriais ou *in situ*, além disso, as condições de umidade e a água subterrânea variam tanto no tempo quanto no espaço. Uma consequência disso é que um talude com fator de segurança de 0,9 pode não romper enquanto que um de 1,1 pode romper (HAMMOND et al., 1992).

Lacasse e Nadim (1996) apresentam uma revisão sobre as incertezas na caracterização das propriedades do solo, incluindo a variabilidade espacial em métodos de medição, expressando a importância da caracterização das incertezas para análise de projetos.

Para tentar resolver esta questão a análise probabilística pode ser utilizada, pois o resultado não é um valor de fator de segurança e sim, a probabilidade de ocorrer a ruptura do talude em questão. Para isso, utilizam-se modelos que quantificam as incertezas e a variabilidade associadas à previsão de ruptura.

Um modelo probabilístico que é bastante conhecido e utilizado na Geotecnia é o método de simulação de Monte Carlo. Este método se baseia em um algoritmo que realiza uma repetida amostragem randômica para calcular os seus resultados. Este método tem sido utilizado há bastante tempo como forma de obter aproximações numéricas de funções complexas.

No caso da utilização da simulação de Monte Carlo para análise de estabilidade de taludes a simulação serve para modelar os atributos que não podem ser amostrados ou medidos, mas podem ser expressos como funções matemáticas das propriedades que podem ser medidas ou amostradas, como é o caso do fator de segurança. Além disso, este método é capaz de incorporar a variabilidade de muitos parâmetros de entrada, o que é necessário para a análise de estabilidade em grandes áreas.

Os seguintes trabalhos desenvolveram a análise considerando parâmetros geotécnicos (determinístico e probabilístico): Okimura e Kawatani, 1987; Dunne, 1991; Montgomery e Dietrich, 1994; Dietrich et al., 1995; Terlien et al., 1995; Wu e Sidle, 1995; Wu et al., 1996; Wu e Abdel-Latif, 2000; Xie et al., 2001, 2003a, 2003b, 2004a, 2004c; Xie, 2002; Esaki et al., 2003; Guzzetti et al., 2005; Frattini et al., 2008; Havenith et al., 2006; Wang, et. al., 2008.

#### 2.4.2.3. Análise por redes neurais

As redes neurais são modelos capazes de tratar problemas complexos, pois são capazes de aprender conforme são treinados. Portanto representam um importante tipo de análise para avaliação de hazard para escorregamentos. Os autores Mayoraz et al., 1996; Gorsevski et al., 2003; Gomez e Kavzoglu, 2005; Saboya Jr. et al., 2006 e Champati Ray et al., 2007 fizeram a avaliação de eventos perigosos à escorregamentos por análise por redes neurais.

## 2.5 Análise Tridimensional de Estabilidade de Talude

Apesar das superfícies potenciais de ruptura possuírem geometria tridimensional (3D) na maioria dos estudos, seja em projetos comerciais ou estudos para previsão de escorregamentos, é utilizado análise bidimensional (2D). Contudo, os resultados da análise de estabilidade de taludes 2D comumente são considerados conservadores quando comparados com as análises tridimensionais. O método bidimensional acaba simplificando o real mecanismo 3D. Neste trabalho será dado enfoque as análises tridimensionais.

Diversos autores desde o final da década de 1960 propuseram diferentes métodos de análise de estabilidade tridimensional baseados na teoria de equilíbrio limite tais como: Anagnosti (1969); Baligh e Azzouz (1975); Hovland (1977); Chen e Chameau (1982); Leshchinsky et al. (1985); Ugai (1985); Leshchinsky e Baker (1986); Baker e Leshchinsky (1987); Xing (1987); Zang (1987); Gens et al. (1988); Ugai e Hosobori (1988); Hungr (1987); Hungr et al. (1989); Leshchinsky e Huang (1992); Lam e Fredlund (1993); Lin et al. (1997); Feng et al. (1999); Huang e Tsai (2000); Chang (2002); entre outros. Duncan (1996) apresentou um resumo de 24 publicações sobre o assunto, como é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Métodos de análise de estabilidade de talude tridimensional (DUNCAN, 1996).

<b>Autor(es)</b>	<b>Método</b>	<b>Força</b>	<b>Geometria do talude/ superfície de ruptura</b>	<b>Resultados 3D encontrados</b>
Anagnosti (1969)	Morgenstern e Price estendido	$c, \phi$	Irrestrito/irrestrito	$F_3 = 1,5 F_2$ em um caso
Baligh e Azzouz (1975)	Arco circular estendido	$\phi = 0$	Taludes simples/superfícies de revolução	$F_3 > F_2$
Giger e Krizek (1975)	Limite superior da teoria da plasticidade perfeita	$c, \phi$	Taludes com bordas/espiral log	$F_3 > F_2$
Giger e Krizek (1976)	Limite superior da teoria da plasticidade perfeita	$c, \phi$	Taludes com bordas/espiral log (com carga no topo do talude)	$F_3 > F_2$
Baligh et al. (1977)	Arco circular estendido	$\phi = 0$	Taludes simples com carga/superfícies de revolução	$F_3 > F_2$
Hovland (1977)	Método padrão de fatias estendido	$c, \phi$	Irrestrito/irrestrito	$F_3 < F_2$ para alguns casos
Azzouz et al. (1981)	Círculo sueco (Swedish circle) estendido	$\phi = 0$	Para encostas reais/superfícies de revolução	$F_3 = 1,07 F_2$ até $1,3 F_2$
Chen e Chameau (1982)	Spencer estendido e elementos finitos	$c, \phi$	Irrestrito/irrestrito	Resultados do método Spencer são similares aos de Elementos finitos
Chen e Chameau (1983)	Spencer estendido	$c, \phi$	Irrestrito/irrestrito	$F_3 < F_2$ para alguns casos
Azzouz e Baligh (1983)	Círculo sueco (Swedish circle) estendido	$\phi = 0$	Taludes simples/superfícies de revolução (com cargas no topo)	$F_3 > F_2$

Dennhardt e Forster (1985)	Assumido uma inclinação na superfície de ruptura	$c, \phi$	Taludes com carga/irrestrito	$F_3 > F_2$
Leshchinsky et al. (1985)	Equilíbrio-limite e análises variadas	$c, \phi$	Irrestrito	$F_3 > F_2$
Ugai (1985)	Equilíbrio-limite e análises variadas	$\phi = 0$	Taludes verticais/cilíndricos	$F_3 > F_2$
Leshchinsky e Baker (1986)	Equilíbrio-limite e análises variadas	$c, \phi$	Taludes contidos na 3ª dimensão/irrestrito	$F_3 > F_2$ para $c > 0$ , $F_3 = F_2$ para $c = 0$
Baker e Leshchinsky (1987)	Equilíbrio-limite e análises variadas	$c, \phi$	Dados cônicos/irrestrito	$F_3 > F_2$
Cavounidis (1987)	Equilíbrio-limite	$c, \phi$	Irrestrito/irrestrito	$F_3$ tem que ser $> F_2$
Hungr (1987)	Bishop modificado estendido	$c, \phi$	Irrestrito/superfícies de revolução	$F_3 > F_2$
Gens et al. (1988)	Círculo sueco (Swedish circle) estendido	$\phi = 0$	Taludes simples/superfícies de revolução	$F_3 > F_2$
Leshchinsky e Mullet (1988)	Equilíbrio-limite e análises variadas	$c, \phi$	Taludes verticais com bordas/irrestrito	$F_3 > F_2$
Ugai (1988)	Método padrão de fatias estendido, Bishop modificado, Janbu e Spencer	$c, \phi$	Irrestrito/irrestrito	$F_3 > F_2$ , exceto para método padrão de fatias
Xing (1988)	Equilíbrio-limite	$c, \phi$	Irrestrito/elipsoidal	$F_3 > F_2$
Michalowski (1989)	Teorema cinemático do limite de plasticidade	$c, \phi$	Irrestrito/irrestrito	$F_3 > F_2$
Seed et al. (1990)	Ad hoc bi e tridimensional	$c, \phi$	Para um caso particular, a ruptura de Kettleman Hills	$F_3 < F_2$
Leshchinsky e Huang (1991)	Equilíbrio-limite e análises variadas	$c, \phi$	Irrestrito/irrestrito	$F_3 > F_2$

Todos estes métodos dividem a massa em ruptura em um número “ $n$ ” de colunas com interfaces verticais (Figura 23) e utilizam as condições de equilíbrio estático para encontrar o fator de segurança. Pressupostos devem ser assumidos para tornar o problema solúvel estatisticamente e facilitar os procedimentos numéricos.

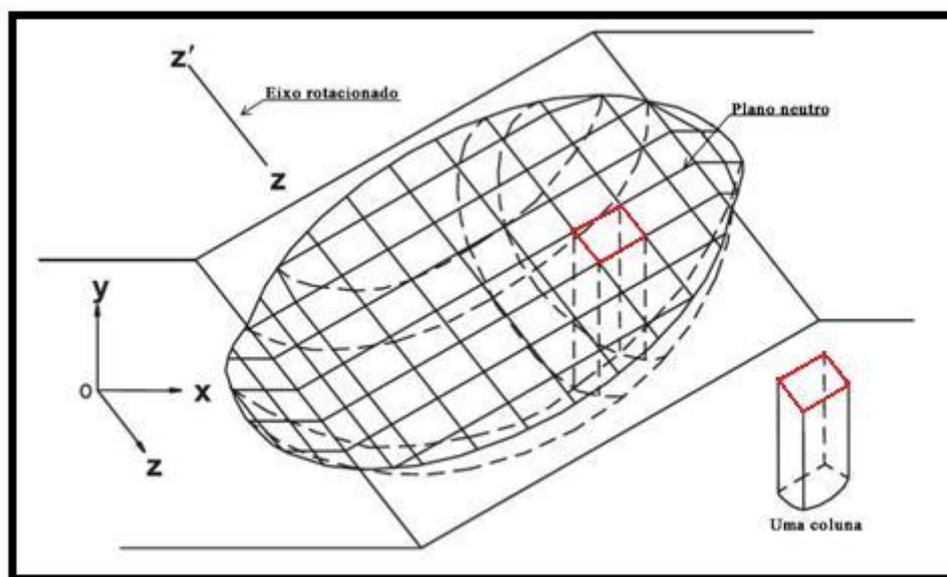


Figura 23 - Discretização de uma massa em ruptura (CHEN et al. 2003).

Um número considerável de trabalhos negligencia os componentes da força de cisalhamento vertical das forças intercolunas e projetam as forças aplicadas em uma coluna na direção vertical (HUNGR et al., 1989; HUANG e TSAI, 2000). A força normal da base da coluna pode ser prontamente determinada sem o conhecimento das forças intercolunas desconhecidas (CHEN et al., 2003). As equações de força (ou de momento de equilíbrio) são subseqüentemente estabelecidas para o cálculo do fator de segurança.

Como já foi mencionado existem diversos métodos de análise de estabilidade de talude tridimensionais, porém neste trabalho será adotado o de Hovland (1977).

### 2.5.1 Método de Hovland (1977)

O método de Hovland foi proposto no final da década de 1970 sendo um dos mais conhecidos dentre os trabalhos sobre o tema na literatura científica. Hovland modificou o tradicional método bidimensional para três dimensões através da substituição das fatias por colunas. Neste método as forças intercolunas que atuam nos lados das colunas são ignoradas.

De acordo com o autor a direção de escorregamento pode ser relativamente curva dependendo das condições de contorno geológicas e topográficas, como pode ser observado na Figura 24 onde uma encosta é esquematicamente representada.

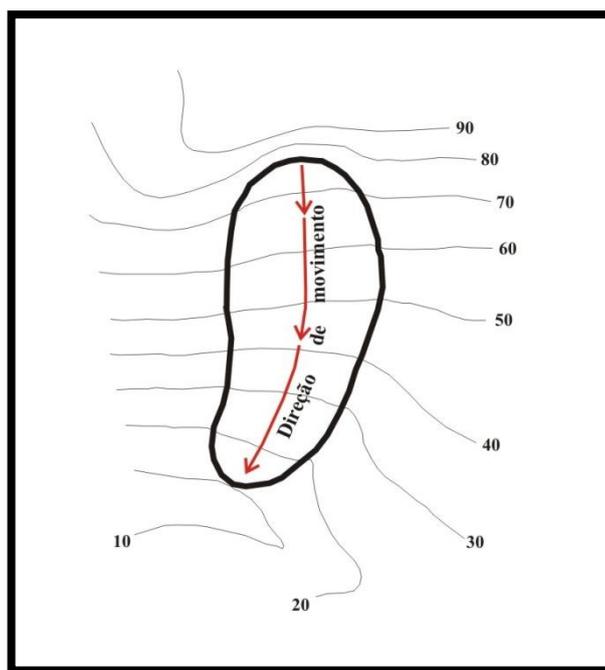


Figura 24 - Perspectiva em plano da topografia de um escorregamento (HOVLAND, 1977).

De acordo com Hovland a direção da coordenada  $y$  é paralela a direção de movimento de escorregamento (*downslope movement*). As coordenadas  $x$  e  $y$  são perpendiculares e estão no plano horizontal; e eles também são perpendiculares a direção da coordenada  $z$ , que é vertical (Figura 25).

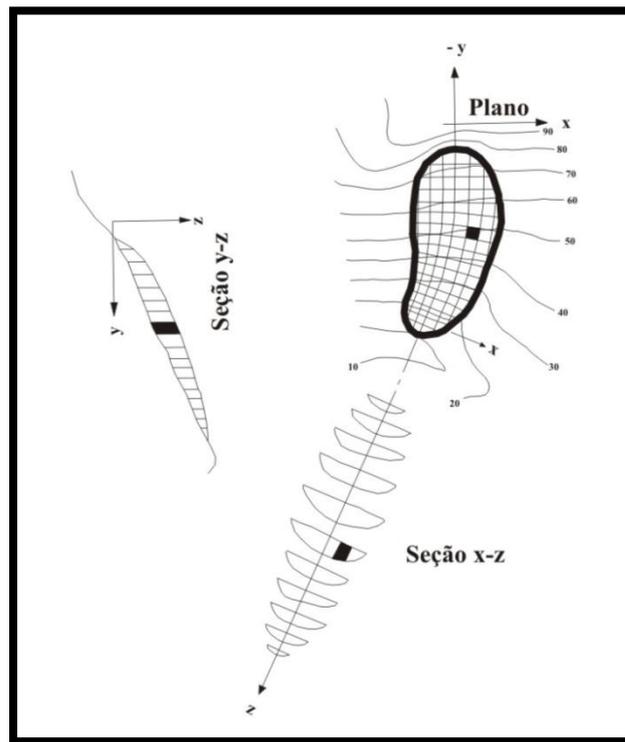


Figura 25 - Perspectivas em plano e em seções de um escorregamento (HOVLAND, 1977).

Uma única coluna de solo, análoga a fatia da análise 2D, é apresentada na Figura 25. As perspectivas em planta e em perfis desta coluna de solo são ilustradas esquematicamente na Figura 26. A área de uma coluna de solo no plano horizontal é definida por  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , que pode ser estabelecido diretamente no mapa topográfico. A inclinação da superfície em ruptura é definida pelos ângulos de mergulho  $\alpha_{xz}$  no plano x-z e  $\alpha_{yz}$  no plano y-z.

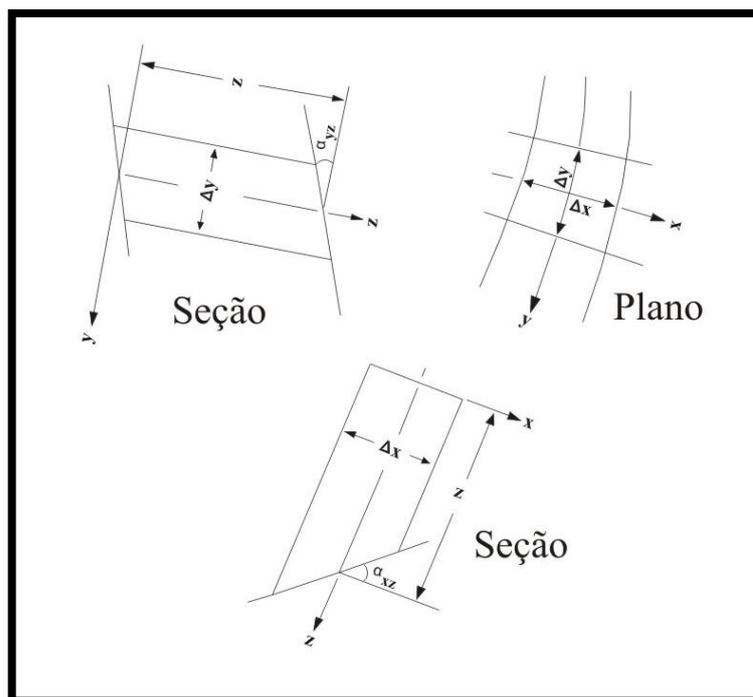


Figura 26 - Perspectivas em planta e em seções de uma coluna de solo (HOVLAND, 1977).

Uma perspectiva 3D da coluna de solo é apresentada na Figura 27. Nas análises seguintes, assume-se que a coluna de solo é pequena o suficiente que todas as suas arestas e faces podem ser consideradas como linhas retas. A superfície no topo da coluna pode até ser irregular, mas isso é assumido como relativamente não importante para a análise. A profundidade da coluna,  $z$ , é simplesmente calculada aproximadamente a partir do centro da superfície de topo até o centro da superfície de base (a superfície de ruptura).

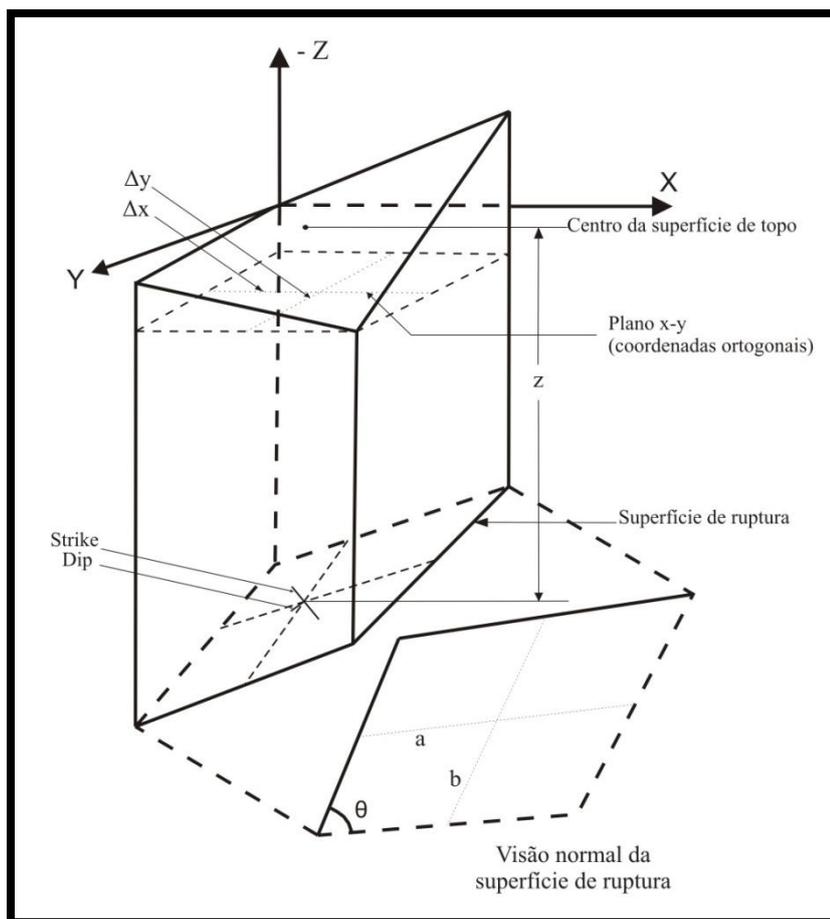


Figura 27 - Perspectiva tridimensional de uma coluna de solo (HOVLAND, 1977).

A interseção dos eixos cartesianos com a parte inferior da base da coluna (superfície de ruptura) ilustrado na figura anterior é apresentada da Figura 28.

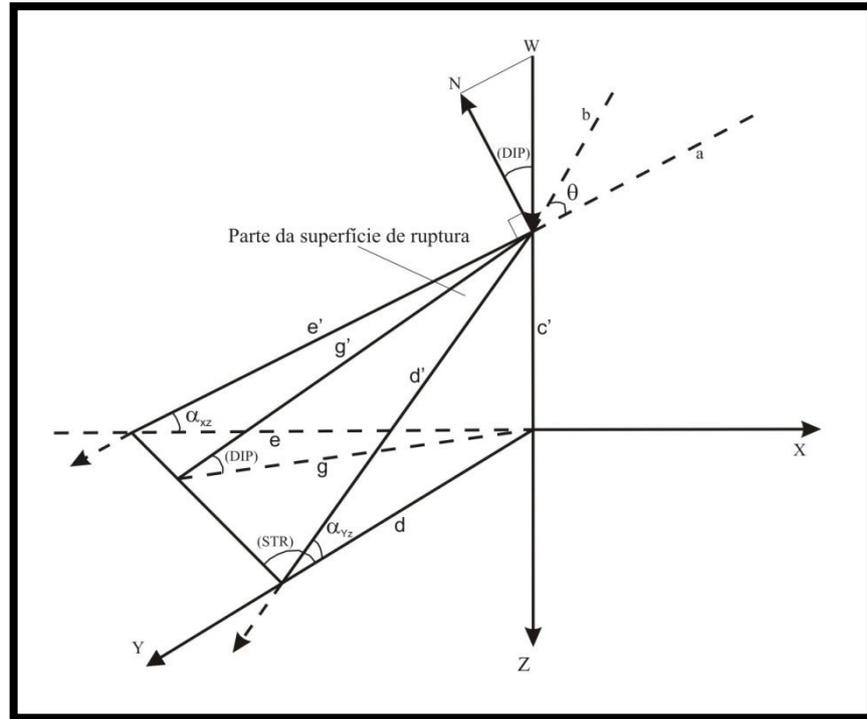


Figura 28 - Perspectiva 3D de parte da superfície de ruptura de uma coluna de solo (HOVLAND, 1977).

A interseção da superfície de ruptura com o plano horizontal nos dá a linha de *strike* (direção geológica), e o ângulo de *strike* (STR) é definido como sendo o ângulo entre a linha de *strike* e o eixo y no plano horizontal.

A partir da Figura 28 as expressões para STR podem ser deduzidas:

$$\sin(STR) = \frac{e}{f} = \frac{\frac{c'}{\tan \alpha_{xz}}}{\sqrt{e^2 + d^2}} = \frac{\frac{c'}{\tan \alpha_{xz}}}{\sqrt{\left(\frac{c'}{\tan \alpha_{xz}}\right)^2 + \left(\frac{c'}{\tan \alpha_{yz}}\right)^2}} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\sin(STR) = \left[ 1 + \left( \frac{\tan^2 \alpha_{xz}}{\tan^2 \alpha_{yz}} \right) \right]^{-1/2} \quad \text{Eq. 3}$$

Similarmente, uma expressão geral pode ser derivada para o cálculo do ângulo de mergulho (DIP):

$$\cos(DIP) = \frac{g}{g'} = \frac{d \sin(STR)}{\frac{c}{\sin(DIP)}} = \frac{\left(\frac{c'}{\tan \alpha_{yz}}\right) \sin(STR)}{\frac{c}{\sin(DIP)}} = \frac{\sin(DIP) \sin(STR)}{\tan \alpha_{yz}} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\cos(DIP) = (1 + \tan^2 \alpha_{xz} + \tan^2 \alpha_{yz})^{-1/2} \quad \text{Eq. 5}$$

Para calcular a área da superfície de ruptura de uma coluna de solo na Figura 27 e Figura 28 foi apresentado que esta área é geralmente quadrilateral, portanto  $A_3$  pode ser calculado da seguinte forma:

$$A_3 = ab \sin \theta \quad \text{Eq. 6}$$

Observando estas figuras (Figura 27 e Figura 28) através de desdobramentos trigonométricos sabe-se que:

$$\cos \theta = \sin \alpha_{xz} \sin \alpha_{yz} \quad \text{Eq. 7}$$

$$\sin \theta = (1 - \sin^2 \alpha_{xz} \sin^2 \alpha_{yz})^{1/2} \quad \text{Eq. 8}$$

$$a = \frac{\Delta x}{\cos \alpha_{xz}} \quad \text{Eq. 9}$$

$$b = \frac{\Delta y}{\cos \alpha_{yz}} \quad \text{Eq. 10}$$

E substituindo as equações 9 e 10 na equação 8, a área da superfície de ruptura de uma coluna de solo é:

$$A_3 = \Delta x \Delta y \left[ \frac{(1 - \sin^2 \alpha_{xz} \sin^2 \alpha_{yz})^{1/2}}{\cos \alpha_{xz} \cos \alpha_{yz}} \right] \quad \text{Eq. 11}$$

Assumindo que os lados verticais das colunas de solo não possuam atrito (não são consideradas as forças das faces verticais das colunas de solo, ou a sua influência é desprezada), o fator de segurança tridimensional ( $F_3$ ) pode ser expresso pela seguinte equação:

$$F_3 = \frac{\sum_x \sum_y [cA_3 + W_3 \cos(DIP) \tan \phi]}{\sum_x \sum_y W_3 \sin \alpha_{yz}} \quad \text{Eq. 12}$$

Sendo que  $A_3$  é determinado pela equação 11;  $\cos(DIP)$  é determinado pela equação 5; o peso de uma coluna de solo é calculado pela equação 13; e o somatório é realizado em ambos x e y.

$$W_3 = \gamma z \Delta x \Delta y \quad \text{Eq. 13}$$

Substituindo as equações 11 e 13 na equação 12, o fator de segurança 3D torna-se:

$$F_3 = \frac{\sum_x \sum_y \left[ \frac{c \Delta x \Delta y \sin \theta}{\cos \alpha_{xz} \cos \alpha_{yz}} + \gamma z \Delta x \Delta y \cos(DIP) \tan \phi \right]}{\sum_x \sum_y \gamma z \Delta x \Delta y \sin \alpha_{yz}} \quad \text{Eq. 14}$$

Recentemente o modelo de Hovland (1997) foi modificado por Xie (2002) e Xie et al. em diversos trabalhos (2003a, 2003b, 2004a, 2004c, 2006a, 2006c, 2007a, 2007b). E este novo modelo adaptado também foi utilizado por Esaki et al. (2003),

Wang et al. (2006) e Cai et al. (2007). Mais à frente alguns destes trabalhos serão brevemente descritos.

## **2.6 Dinâmica da Água no Solo e a Estabilidade de Taludes**

A influência da água da chuva para a instabilização de taludes e deflagração de escorregamentos tem sido objeto de pesquisa por muitos anos e por diversos autores (LIRITANO et al., 1998; TERLIEN, 1998; GASMO et al., 2000; IVERSON, 2000; TSUKAMOTO et al., 2002; AL-HOMOUD et al., 1999; CHOWDHURY e FLENTJE, 2002; WILKINSON et al., 2002; ALEOTTI, 2004; COLLINS e ZNIDARCIC, 2004; KIM et al., 2004; LAN et al., 2005; AHRENDT, 2005).

Durante uma chuva a água quando chega à superfície parte pode infiltrar no perfil de solo, parte pode escoar pela superfície do solo (existindo declividade) e uma parcela ainda pode evaporar. Na análise de estabilidade de taludes o primeiro processo tem suma importância.

A identificação e quantificação dos parâmetros que regem o processo de infiltração de água nas encostas são indispensáveis na análise das condições das encostas. A variação de umidade no meio poroso interfere nas condições de estabilidade de encostas e taludes notadamente sob três aspectos: redução da resistência ao cisalhamento; aumento de peso do maciço; e redução das condições de sucção. A primeira refere-se à presença de água no interior de um maciço que ocasiona a elevação da pressão neutra, a qual reduz a resistência ao cisalhamento do solo até um ponto crítico (na análise determinística conhecida como FS igual a 1). Neste ponto considera-se que as forças solicitantes igualam-se às resistentes, a partir daí pode se iniciar o processo comumente denominado ruptura. Além disso, a

água aumenta o peso do maciço acima da superfície de ruptura e contribui para a geração das forças favoráveis a ruptura. Por último, a infiltração da chuva, causando a saturação do solo e um temporário aumento da pressão neutra (redução da sucção do solo a zero) é geralmente considerada como sendo o mecanismo que mais deflagra escorregamentos rasos durante uma tempestade (Baum e Reid, 1995; Basile et al., 2003; Montgomery et al, 1997, 2002; Guimarães et al., 2003).

### **2.6.1. Infiltração**

A infiltração é a entrada de água no solo através de sua superfície (interface solo-atmosfera) (GREEN e AMPT, 1911). O processo de infiltração pode ocorrer por gravidade e/ou capilaridade, partindo da superfície onde se supõe haver um suprimento de água, para o interior do maciço, avançando como uma frente de umedecimento ao longo do tempo.

O valor da infiltração depende da ocorrência, intensidade e duração da precipitação, temperatura, umidade, velocidade do vento, características e espessura do solo (ou rocha acima do nível d'água), superfície topográfica, vegetação e uso do solo (MENON, 1995). Estes fatores podem apresentar significativa variação espacial e temporal em consequência das variações climáticas, de uso de solo, irrigação e heterogeneidades hidrogeológicas (SHARMA, 1989).

À medida que a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há aporte de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade, sendo a superfície, naturalmente, o primeiro nível a saturar. Normalmente, a infiltração decorrente de precipitações naturais não é capaz de saturar todo o solo, restringindo-se a saturar, quando consegue, apenas os níveis

mais próximos à superfície, conformando um perfil típico onde o teor de umidade decresce com a profundidade.

Quando o aporte de água à superfície cessa a umidade no interior do solo se redistribui, evoluindo para um perfil de umidade inverso, com menores teores de umidade no nível próximo à superfície e maiores nas camadas mais profundas, pois ocorre uma drenagem da camada superficial para as camadas mais profundas do solo e também à evapotranspiração, que se refere à perda de umidade para a atmosfera devido aos processos de evaporação e transpiração vegetal.

A Figura 29 da EPA (1998) ilustra todo este processo do comportamento da água no solo com a profundidade e o tempo, sendo este dividido em três fases: infiltração, redistribuição e drenagem, as quais independem da saturação da porção superficial.

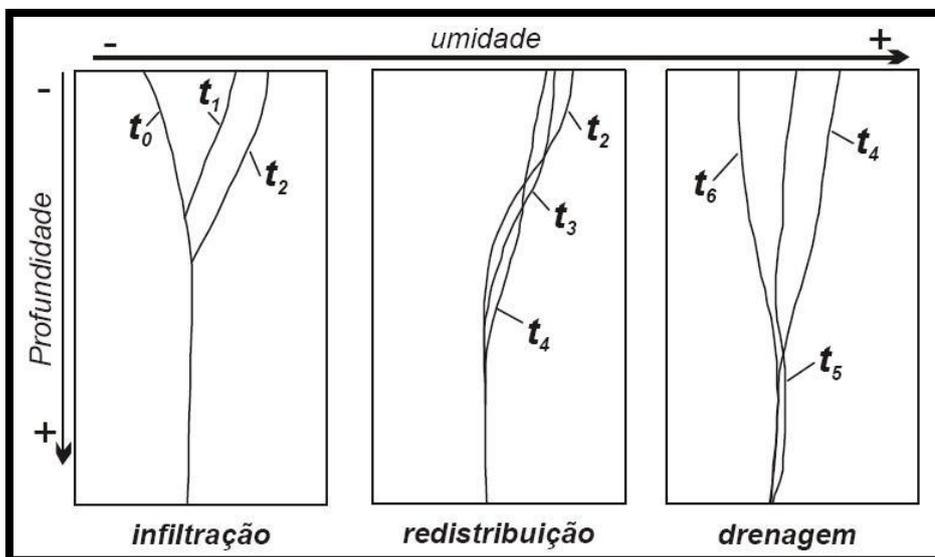


Figura 29 - Comportamento da frente de saturação com o tempo para as três fases. (Adaptado de EPA, 1998)

O conceito de capacidade de infiltração é aplicado ao estudo da infiltração para diferenciar o potencial que o solo tem de absorver água pela sua superfície, em

termos de lâmina por tempo, da taxa de infiltração que acontece quando há disponibilidade de água em superfície. Capacidade de infiltração é a taxa máxima de água, normalmente expressa em termos de lâmina de água por tempo, que o solo permite penetrar através da sua superfície.

Como ilustrado na Figura 30, a capacidade de infiltração ( $f_p$ ) varia com o tempo, ou seja, o valor de  $f_p$  é máximo no início da chuva ( $f_0$ ). Com o passar do tempo a capacidade de infiltração decresce, tendendo a se manter constante quando o solo começa a ficar saturado ( $f_c$ ).

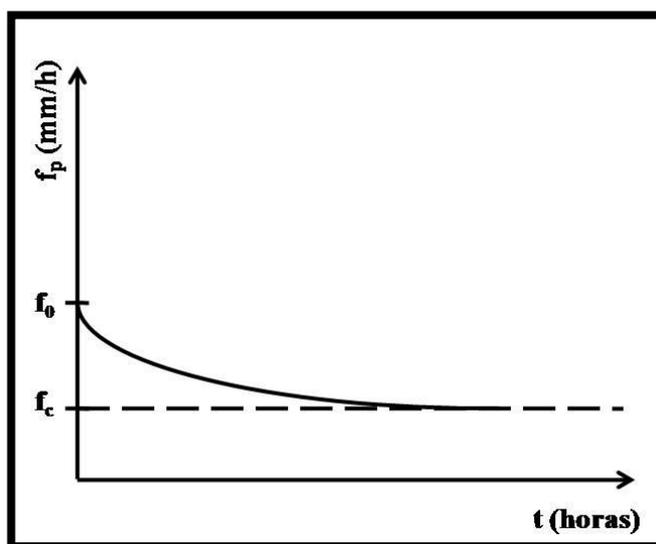


Figura 30 – Curva de infiltração.

A taxa de infiltração é a quantidade de água que um solo, sob uma dada condição, absorve naquele instante, podendo ser menor ou igual à capacidade de infiltração. Também é expressa em unidade de comprimento por tempo.

Velocidade de infiltração é a velocidade média com que a água penetra no solo (VILLELA e MATTOS, 1975). Pode ser expressa em m/s, m/dia ou ainda  $m^3/m^2/dia$  (PINTO et al., 1976).

A característica da curva de infiltração apresentar uma alta taxa de infiltração inicial está relacionada à existência de um elevado potencial mátrico em superfície, o qual diminui à medida que o solo vai se umedecendo. Este decréscimo tende a um valor constante que está associado à nulidade do potencial mátrico e, conseqüentemente, a taxa de infiltração corresponde à condutividade hidráulica saturada.

Se uma precipitação atinge o solo com intensidade menor que a capacidade de infiltração, toda água penetra no solo, provocando uma progressiva diminuição da própria capacidade de infiltração, já que o solo está umedecendo. Se a precipitação continuar, pode ocorrer, dependendo da sua intensidade, um momento em que a capacidade de infiltração diminui tanto que sua intensidade se iguala à da precipitação. Caso a intensidade da chuva seja maior que a capacidade de infiltração, a quantidade excedente de água ficará disponível para formar o escoamento superficial, também conhecido como *run-off*.

Quando termina a precipitação e não há mais aporte de água à superfície do solo, a taxa de infiltração real anula-se rapidamente e a capacidade de infiltração volta a crescer, porque o solo continua a perder umidade para as camadas mais profundas (além das perdas por evapotranspiração).

Outro conceito relacionado ao movimento da água no solo é o termo capacidade de campo. A quantidade de água que um perfil de terreno sem vegetação e evaporação retém contra a ação da gravidade, após plenamente inundado e deixado drenar livremente por uns poucos dias (um a quatro dias), em condições de campo, determina o volume máximo aproximado de água que um solo bem drenado pode armazenar por longos períodos sem evapotranspiração. Esta

umidade é chamada capacidade de campo do solo, segundo definição dada por Veihmeyer e Hendrickson (1931).

Simplificadamente, a capacidade de campo é a quantidade de água retida pelo solo após a drenagem de seu excesso, ou seja, quando a velocidade do movimento descendente de água é praticamente nula. Nesta condição, as forças matriciais de sucção presentes no solo se igualam às forças gravitacionais.

Alguns estudos mostram que a umidade do solo na capacidade de campo não está totalmente em equilíbrio e que o movimento da água pode continuar por vários dias ou mesmo meses (HILLEL, 1980; REICHARDT, 1988). Segundo Reichard (1986), o conceito de capacidade de campo pode ser considerado um critério prático para a determinação do limite máximo de água que um solo pode reter após o término da drenagem interna por gravidade.

Na tentativa de expressar matematicamente o fluxo d'água no interior de um maciço poroso, diversas equações de infiltração já foram propostas a partir de Green e Ampt (1911) como as de Mein e Larson, 1973; Morel-Seytoux, 1974; Neuman, 1976; Eagleson, 1978; Van Genuchten, 1980; Philip, 1992b; Smith et al., 1993; Ogden e Saghafian, 1997; Swartzendruber, 2000; Iverson, 2000.

### **2.6.2. Classificação dos modelos de infiltração**

Os modelos de infiltração podem ser divididos em várias categorias dependendo do objetivo do estudo, condições limites e natureza do sistema superficial. Neste trabalho as equações de infiltração serão classificadas em dois grandes grupos: as equações de base empírica e as de base física. Alguns autores também utilizam essa classificação simplificada (SCOTT, 2000; SKONARD, 2002)

### 2.6.2.1. Equações empíricas

Equações empíricas são aquelas obtidas a partir de dados experimentais resultando em equações específicas para determinados tipos de condições de contorno.

Os modelos empíricos têm a vantagem de permitir relacionar os parâmetros do modelo a características do solo, sem que estes obrigatoriamente tenham significado físico e englobar na determinação de suas constantes alguns fatores que são difíceis de serem considerados nos modelos físicos (BRANDÃO et al., 2003).

As soluções empíricas são apresentadas na forma de equações simplificadas onde os seus parâmetros são gerados por meio de ajuste de curvas obtidas a partir de medidas reais. Essas equações promovem estimativas de infiltração acumulada e de velocidades de infiltração, não contribuindo para a obtenção de informações a respeito da distribuição de água no solo.

A principal desvantagem do emprego de equações empíricas é que os dados ajustados são válidos somente para as condições de contorno em que foram determinados, ou seja, desta forma não podem ser adotados para outros tipos de solos.

Trabalhos como os de Kostiaikov (1932), Horton (1940), USDA Soil Conservation Service (1957), Holtan (1961) se utilizaram de soluções empíricas para analisar a infiltração.

As principais equações de infiltração deste grupo encontram descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Principais equações de infiltração com base empírica.  $i(t)$  é a infiltração e  $I(t)$  é a infiltração acumulada.

Equação	Expressão	Observações
<b>Kostiakov</b> <b>(1932)</b>	$i(t) = \alpha t^{-\beta}$ $I(t) = [(\alpha/1-\beta)t^{(1-\beta)}$	$\alpha > 0$ e $0 < \beta < 1$ são constantes empíricas $t =$ tempo
<b>Horton</b> <b>(1940)</b>	$i(t) = i_f + (i_0 - i_f)e^{-\gamma t}$ $I(t) = i_f t + 1/\gamma (i_0 - i_f)(1 - e^{-\gamma t})$	$i_0$ e $i_f$ são vel. de infiltração inicial e final $\gamma$ é uma constante empírica
<b>Holtan</b> <b>(1961)</b>	$I(t) = i_f t + ab(\omega - I)^{1.4}$	0.25 a 0.28 é uma constante relativa a condição na superfície; $b$ é um fator de escala; $\omega$ é o déficit de umidade inicial (cm)

### 2.6.2.2. Equações com base física

As equações com base física apóiam-se em procedimentos analíticos que levam em consideração os princípios da física do solo. Os modelos físicos são baseados na teoria física do escoamento em meios porosos, que é descrito pela equação de Richards ou mesmo pela equação de Darcy, a partir da qual a equação de Richards foi desenvolvida (LIBARDI, 2000).

Green e Ampt (1911) e Philip (1957) foram os primeiros pesquisadores a obter equações desta natureza, obtendo soluções numéricas para perfis de solo homogêneo com profundidade infinita e umidade inicial uniforme.

Os modelos baseados nas equações físicas são fundamentados basicamente em uma das três equações seguintes.

#### 2.6.2.2.1. Equação de Philip

$$q(t) = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + A \quad \text{Eq. 15}$$

$$I(t) = S t^{1/2} + A t \quad \text{Eq. 16}$$

Onde  $q$  é a taxa de infiltração (cm/h);  $t$  é o tempo de infiltração (h);  $S$  é a sorptividade ( $\text{cm}/\text{h}^{1/2}$ ) que é o parâmetro que governa os estágios iniciais de infiltração;  $A$  é a taxa de infiltração constante após longos períodos (cm/h) que depende das propriedades do solo e está intimamente relacionada com a condutividade hidráulica saturada; e  $I(t)$  é a infiltração acumulada (cm) no tempo  $t$ .

Durante a fase inicial de infiltração (ou seja, quando  $t$  é muito pequeno), o primeiro termo da Eq. 15 é mais importante. Nesta fase, a infiltração vertical prossegue a uma taxa praticamente idêntica como a da absorção ou da infiltração horizontal devido à componente gravidade, representada no segundo termo da equação, sendo considerado desprezível. À medida que a infiltração continua, o segundo termo torna-se progressivamente mais importante até que ele domina o processo de infiltração.

#### 2.6.2.2.2. Equação de Green-Ampt

O estudo de Green e Ampt publicado em 1911 foi o primeiro a apresentar uma equação baseada em leis físicas onde é possível descrever o processo de infiltração da água no solo. É um modelo relativamente simples e tem como vantagens a facilidade de obtenção dos parâmetros que são requisitados pelo mesmo e a sua flexibilidade em se adaptar a cenários diversos. Apesar de sua simplicidade e ser o primeiro modelo a ser apresentado este estudo proporcionou consideráveis avanços na física do solo aplicada.

Este modelo parte do princípio que a água entra no perfil do solo e continua o deslocamento vertical do topo para o interior do perfil seguindo a forma de um pistão, ou seja, tem um horizonte bem definido entre a porção saturada e a não saturada.

A equação assume que:

- ✓ O fluxo vertical de água obedece a Lei de Darcy;
- ✓ A sucção na frente de saturação permanece constante, em função do tempo e da posição;
- ✓ Uma altura constante de água é mantida na superfície do solo.

As equações que descrevem este modelo são:

$$\frac{1}{K_S} = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{3}\right)t + \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\chi t + t^2} + \left(\frac{\sqrt{2}-1}{3}\right)\chi[\ln(t + \chi) - \ln \chi] + \frac{\sqrt{2}}{3}\chi \left[ \ln\left(t + \frac{\chi}{2} + \sqrt{\chi t + t^2}\right) - \ln \frac{\chi}{2} \right] \quad \text{Eq. 17}$$

$$\frac{q}{K_S} = \frac{\sqrt{2}}{2}\tau^{-1/2} + \frac{2}{3} - \frac{\sqrt{2}}{6}\tau^{1/2} + \frac{1-\sqrt{2}}{3}\tau \quad \text{Eq. 18}$$

Com:

$$\chi = \frac{(h_s - h_f)(\theta_s - \theta_0)}{K_S} \quad \text{Eq. 19}$$

$$\tau = \frac{t}{t + \chi} \quad \text{Eq. 20}$$

Sendo,  $q$  é a taxa de infiltração (cm/h);  $K_S$  é a condutividade hidráulica saturada (cm/h);  $t$  é o tempo (h);  $h_s$  é a espessura da superfície de *ponding* ou a pressão capilar superficial (cm);  $h_f$  é a pressão capilar na frente de umedecimento (cm);  $\theta_s$  é a umidade volumétrica de saturação (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); e  $\theta_0$  é a umidade volumétrica inicial (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>).

O modelo de Green-Ampt foi modificado por diversos pesquisadores para atender condições e objetivos específicos tais como Bouwer (1969); Childs e Bybordi (1969); Fok (1970); Hillel e Gardner (1970); Mein e Larson (1973); Morel-Seytoux e Kanji (1974); James e Larson (1976); Brakensiek (1977); Chu (1978); Freyberg et al. (1980); Hachun e Alfaro (1980); Moore (1981); Flerchinger et al. (1988); Philip (1993) e Swarzendruber (2000).

#### 2.6.2.2.3. Equação de Richards

A equação de Richards é a equação diferencial geral que descreve o fluxo não saturado, assumindo a presença de uma fase de ar que pode existir livremente em qualquer porção do meio poroso ou região de fluxo, cuja única pressão atuante é a pressão atmosférica (MARINELLI e DURFORD, 1998).

Esta equação deriva da combinação da equação de fluxo de Darcy-Buckingham (Eq. 21) e a equação da continuidade (Eq.22) que define o fluxo transiente no meio poroso (LIBARDI et al., 1980).

$$q = -K(\theta)\nabla\phi(\theta) \quad \text{Eq. 21}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) \quad \text{Eq. 22}$$

A solução analítica para a equação de Richards é bastante complexa, principalmente por abranger as três direções de fluxo, originalmente (Eq. 26).

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K(\theta)\frac{\partial\phi t}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K(\theta)\frac{\partial\phi t}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta)\frac{\partial\phi t}{\partial z}\right] \quad \text{Eq. 23}$$

Diversas equações de fluxo surgiram a partir da simplificação da equação de Richards, sendo comum a apresentação de soluções analíticas com o fluxo unidimensional (eq. 27).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \frac{\partial \phi_t}{\partial x} \right] \quad \text{Eq.24}$$

Na literatura existem diversas soluções obtidas para a solução de Richards, sendo que a maioria apresenta apenas variações nas técnicas de medida de fluxo e dos gradientes de potencial hidráulico (BACCHI e REICHARDT, 1988). Os trabalhos de Swarzendruber e Clague (1989), EPA (1998), Scott (2000) e Raats (2001) apresentam diversos exemplos dessas soluções.

## **2.7 Combinação de Modelagem Hidrológica com Métodos de Cálculo de Fator de Segurança**

Como é possível constatar pelas informações anteriores, a chuva tem papel fundamental na instabilização de taludes e deflagração de movimentos de massa gravitacionais, em especial, os escorregamentos. Wu e Sidle (1995) afirmam que devido a escorregamentos rasos sempre ocorrerem como resultado da infiltração de água a partir de chuvas intensas é razoável para avaliar este tipo de ruptura de talude utilizar modelos físicos que simulam os processos hidrogeológicos e geotécnicos transientes responsáveis pela estabilidade do talude.

Este tipo de análise tem sido, nos últimos anos, cada vez mais utilizada, onde um modelo hidrogeológico é incorporado a um método determinístico de cálculo de

estabilidade para avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamentos como resultado de eventos de chuva.

Assim como já foi apresentado, existem diversos modelos de cálculo de estabilidade de talude e também muitos modelos hidrogeológicos. Desta forma, diversos modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para prever o comportamento da água em encostas naturais ou modificadas.

Essas técnicas com base nas leis físicas modelam em geral a relação entre os parâmetros que influenciam a infiltração da água no solo e o comportamento da água em subsuperfície. Porém, modelos simplificados geralmente negligenciam o fluxo transiente através da zona não saturada e assumem que a velocidade de infiltração é sempre maior do que a quantidade de chuva, considerando que qualquer chuva irá recarregar a zona saturada instantaneamente.

Os modelos que consideram os efeitos da zona não saturada são mais realísticos e também mais complexos, pois requerem estimativas de porosidade efetiva ou umidade volumétrica, potencial de retenção da água no solo, velocidade de infiltração e condutividade hidráulica saturada e não saturada.

O fato de necessitarem de muitas informações, a precisão e confiabilidade dos resultados dependem diretamente do grau de incerteza em relação aos parâmetros utilizados. Os estudos são, em geral, realizados em áreas menores ou restritas e lançam mão de modelos de distribuição de água mais sofisticados, pois há casos em que o modelo utilizado só é possível de ser aplicado a um determinado cenário.

No caso de locais específicos os modelos hidrogeológicos são obtidos a partir da instrumentação de taludes ou encostas e de monitoramentos constantes para avaliação da reação do solo logo após a ocorrência dos eventos pluviométricos.

Geralmente os resultados deste tipo de análise são apresentados sob a forma de mapas. Os mapas possuem áreas individualizadas e para cada área é calculado um valor de fator de segurança. Estes valores de FS foram obtidos através do cálculo da equação do FS sendo que um ou mais parâmetros desta equação é obtido através de simulações de infiltração que utilizam os dados de chuva. Tais mapas são elaborados para facilitar a visualização dos resultados e o processo nem sempre é automatizado.

Alguns exemplos deste tipo de análise são apresentados por Iverson (1990), Pradel e Raad (1993), Alonso et al. (1995), Spierenburg et al. (1995), Crosta (1997), Fourier et al. (1998), Terlien (1998), Crozier (1999), Enoki et al. (1999), Iverson (2000), Wu e Abdel-Latif (2000), Ng et al. (2001), Cho e Lee (2002), Dykes (2002), Wilkinson et al. (2002), Collins e Znidarcic (2004), Kim et al. (2004), Xie et al. (2004b), Xie et al (2007a).

A seguir serão apresentados alguns modelos desenvolvidos que combinaram um modelo de infiltração com um método de cálculo de estabilidade e que apresentaram resultados satisfatórios para avaliação da estabilidade de encostas frente a processos de escorregamentos, principalmente do tipo translacional e de pequena profundidade.

### **2.7.1 O modelo SHALSTAB (1998)**

O SHALSTAB (*SHALlow STABility*) é um modelo matemático determinístico elaborado para a previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos, desenvolvido por Dietrich et al., (1993) e posteriormente automatizado por Dietrich e Montgomery (1998). Este modelo combina um modelo hidrológico com um modelo de estabilidade de encosta, dentro de um ambiente SIG (Sistema de Informação

Geográfica). O resultado é um grid regular onde é calculado o grau de susceptibilidade a escorregamento para cada célula.

O modelo de estabilidade de encosta utilizado no SHALSTAB é baseado na teoria de talude infinito de Mohr-Coulomb, onde é possível definir que a tensão tangencial, no momento da ruptura pode ser expressa por (COULOMB apud CARSON e KIRKBY, 1972):

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \phi \quad \text{Eq. 25}$$

Sendo,  $\tau$  a tensão tangencial,  $c'$  a coesão efetiva,  $\sigma$  a tensão normal,  $u$  a poro-pressão e  $\phi$  o ângulo de atrito interno do solo.

Neste modelo o grau de susceptibilidade é calculado em função da razão  $h/z$ , que representa a proporção da coluna de solo saturado. Assim, podemos associá-lo com o modelo hidrológico.

$$\frac{h}{z} = \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \quad \text{Eq. 26}$$

Sendo,  $h$  a altura da coluna de água no subsolo,  $z$  a espessura do solo,  $c'$  a coesão efetiva,  $g$  a aceleração da gravidade,  $\rho_s$  a massa específica do solo,  $\rho_w$  a massa específica da água,  $\theta$  a declividade,  $\phi$  o ângulo de atrito interno do solo.

O modelo hidrológico utilizado no SHALSTAB é baseado na formulação matemática desenvolvida por O'Loughlin (1986) para estimar o nível de saturação do solo no relevo a partir dos fluxos a montante do ponto do relevo, considerando a declividade ( $\theta$ ) e a transmissividade do solo ( $t$ ). O modelo baseia-se na análise

hidrológica inicialmente abordada por Beven e Kirkby (1979), onde a saturação do solo está relacionada com a razão da área drenada que passa por uma unidade de comprimento de contorno da topografia ( $a/b$ ) pela declividade (Figura 31). Na Figura 31,  $a$  é a área drenada a montante (área de contribuição) de um comprimento de contorno unitário  $b$ ,  $z$  é a espessura vertical do solo,  $h$  é altura da coluna d'água no solo acima do plano de ruptura e  $\theta$  é a declividade.

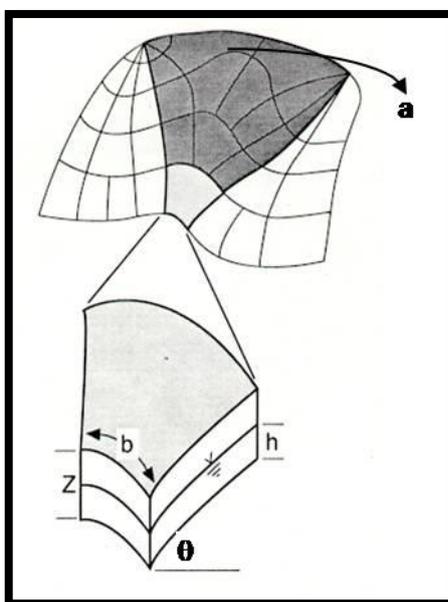


Figura 31 - Esquema das variáveis utilizadas no modelo hidrológico de Montgomery e Dietrich (1994).

O'Loughlin (1986) considera que o fluxo infiltra até um plano de mais baixa condutividade, seguindo posteriormente um caminho determinado pela topografia. Assim a condição de saturação do solo, em estado de equilíbrio, pode ser definida por um índice de umidade ( $w$ ) expresso da seguinte equação:

$$w = \left( \frac{Qa}{Tbsen\theta} \right) \quad \text{Eq. 27}$$

Sendo,  $Q$  a precipitação,  $a$  a área drenada a montante (área de contribuição),  $T$  a transmissividade,  $b$  o comprimento unitário e  $\theta$  a declividade.

Para relacionar o modelo hidrológico com o modelo de estabilidade de encosta, Montgomery & Dietrich (1994) desenvolveram o índice de umidade de O'Loughlin em função da razão  $h/z$ .

$$\frac{h}{z} = \frac{Qa}{Tbsen\theta} \quad \text{Eq. 28}$$

Desta forma igualando-se as equações 26 e 28 tem-se a equação que combina os dois modelos acima, que é dada por:

$$\frac{Q}{T} = \frac{\sin \theta}{(a/b)} \left[ \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right] \quad \text{Eq. 29}$$

O resultado final do SHALSTAB é uma setorização em classes de estabilidade da área. A Tabela 5 apresenta as classes de estabilidade definidas pelo SHALSTAB e a Figura 32 um exemplo de resultado gerado por esta metodologia.

Tabela 5 - Classes de estabilidade definidas pelo SHALSTAB.

Setor	Condição	Classificação da área
A	$a/b > (Q/T) \text{ sen } \theta \text{ e } \tan \theta \leq \tan \phi (1 - \rho_w/\rho_s)$	Altamente Estável
B	$a/b < (Q/T) \text{ sen } \theta \text{ e } \tan \theta \leq \tan \phi (1 - \rho_w/\rho_s)$	Estável
C	$a/b < (Q/T) \text{ sen } \theta \text{ e } \tan \phi (1 - \rho_w/\rho_s) < \tan \theta < \tan \phi$	Moderadamente Estável
D	$a/b < (Q/T) \text{ sen } \theta \text{ e } \tan \phi (1 - \rho_w/\rho_s) < \tan \theta < \tan \phi$	Pouco Estável
E	$a/b > (Q/T) \text{ sen } \theta \text{ e } \tan \phi (1 - \rho_w/\rho_s) < \tan \theta < \tan \phi$	Moderadamente Instável
F	$\tan \theta > \tan \phi \text{ e } a/b < (Q/T) \text{ sen } \theta$	Instável
G	$\tan \theta > \tan \phi \text{ e } a/b > (Q/T) \text{ sen } \theta$	Incondicionalmente Instável

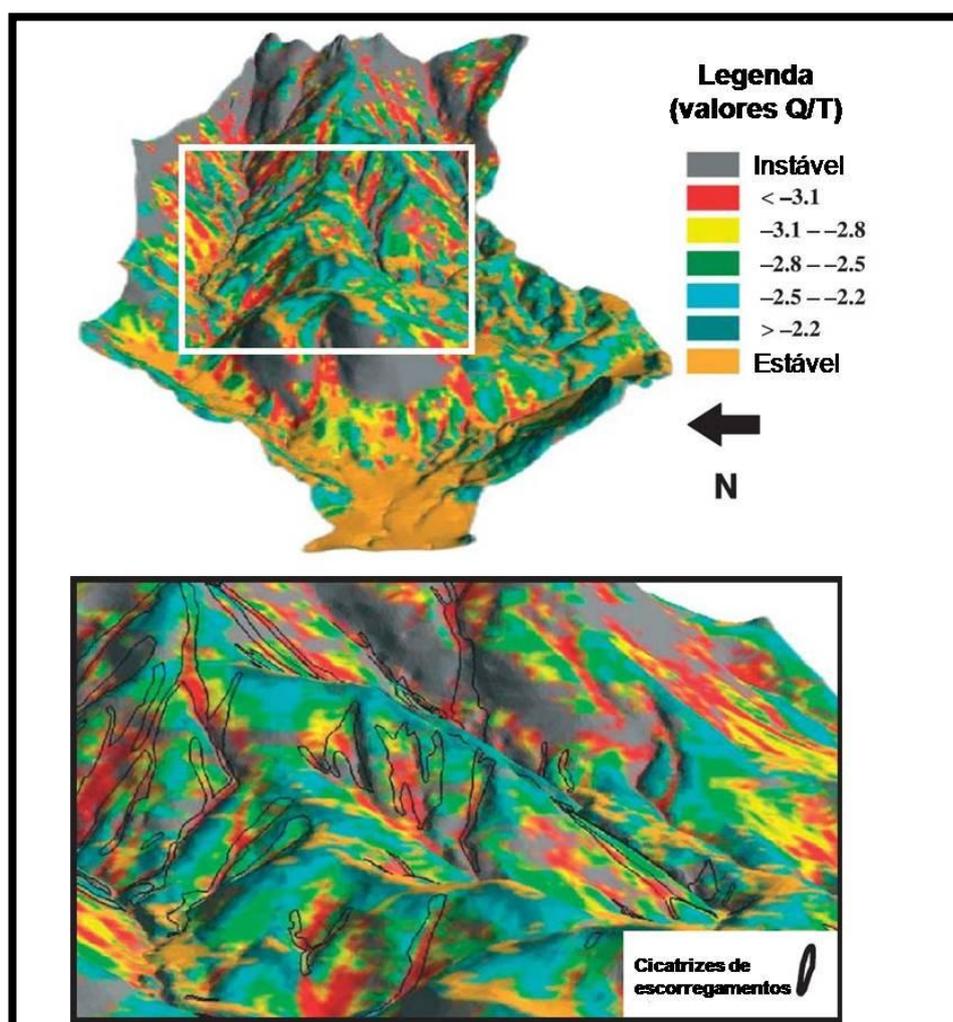


Figura 32 – Exemplo de resultado gerado pelo SHALSTAB. A legenda indica as classes de estabilidade obtidas pelo cálculo do modelo (FERNANDES et al., 2004).

### 2.7.2 O modelo de NG et al. (2001)

NG et al. (2001) publicou um trabalho onde considera a análise numérica tridimensional para investigar o comportamento da água em um talude de corte inicialmente não-saturado em uma rodovia de Hong Kong quando sujeita a diferentes eventos de chuva, com quantidade, duração e frequência diversas.

Os autores utilizaram o programa FEMWATER para a realização da modelagem tridimensional do fluxo subterrâneo. O FEMWATER é um programa em elementos finitos tridimensional para análise de fluxo e transporte de solutos em meios saturados e não-saturados (LIN et al., 1997). No caso do estudo desses autores o foco foi a análise do fluxo subterrâneo no talude, portanto, os efeitos de compressibilidade da água e diferentes horizontes do solo, concentração química na poro-pressão de água e sucção não foram considerados. Ademais, sob a consideração de fluxo isotrópico, a equação governante para o fluxo de água subterrâneo em espaço tridimensional com o sistema de coordenada x, y e z adotado pelo programa é:

$$k_w \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial k_w}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial k_w}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial k_w}{\partial z} \frac{\partial h}{\partial z} + q = F \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Eq. 30}$$

Sendo, F o coeficiente de armazenamento,  $k_w$  a permeabilidade, h a carga hidráulica, q o fluxo de contorno, e t o tempo.

A Figura 33 mostra a malha de elementos finitos do lugar de investigação do estudo desses autores. Ela teve um total de 4005 elementos com 2500 nós.

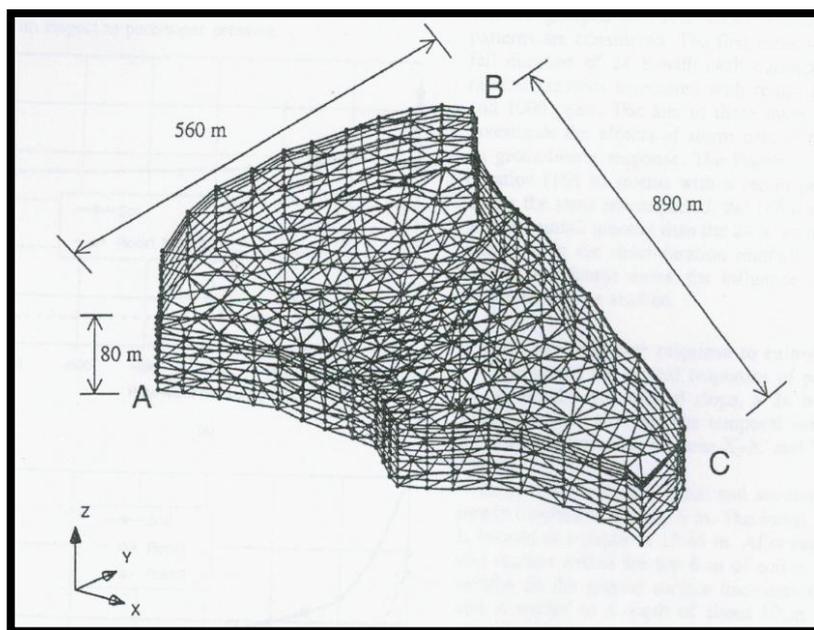


Figura 33 - Malha em elementos finitos tridimensional do local de investigação (NG et al., 2001).

Os tipos de chuva simulados foram extraídos de uma análise estatística a partir de um registro histórico de chuva por hora existente em Hong Kong. Foram considerados três diferentes períodos de retorno: 10, 100 e 1000 anos. A Tabela 6 apresenta o sumário dos eventos de chuva que foram simulados.

Tabela 6 - Sumário dos eventos de chuva simulados

Parâmetro	Séries			
	1	2	3	4
Período de retorno (anos)	10	100	1000	100
Duração da chuva (horas)	24	24	24	168
Quantidade total de chuva (mm)	358	597	805	892
Tempo de simulação após a chuva (sem chuva) (horas)	168	168	168	240

Foi observado que a resposta da água para diversos padrões de chuva são diferentes na crista e no pé do talude, implicando que a condição inicial da água subterrânea tem significativa influência para a resposta futura. Na crista, onde o

nível de água é mais profundo, a infiltração da água da chuva apenas reduz a sucção do solo e o nível de água não é significativamente afetado. Contudo, no pé do talude onde o solo encontra-se próximo da saturação devido ao nível de água ser raso, mesmo diferentes padrões de chuva tem limitada influência na permeabilidade e na poro-pressão de água. Além disso, a resposta da água no pé do talude é influenciada pelo fluxo subterrâneo à montante do talude de corte.

Foi observado também que chuvas intensas e de pequena duração causam grandes variações na poro-pressão de água em profundidades rasas, e chuvas de longa duração tem maior influência na água subterrânea em solos profundos devido geralmente a maior quantidade de chuva. Para chuvas prolongadas, a diferença na distribuição da poro-pressão de água resultante de diferentes tipos de chuva é menos significativa que para chuvas intensas de pequena duração.

### **2.7.3 O modelo de Wilkinson et al. (2002)**

O trabalho de Wilkinson et al. (2002) apresenta uma extensão do modelo de estabilidade combinado com modelo hidrológico (CHASM – *Combined Hydrology and Stability Model*) onde inclui os efeitos de vegetação e do plano topográfico na estabilidade de talude.

O resultado do modelo é baseado em parâmetros físicos e é projetado para ser aplicado em taludes específicos onde a avaliação detalhada da hidrologia não-saturada e saturada é necessária em relação a vegetação, topografia e estabilidade de talude. O modelo foi aplicado na região da Baía de Hawke na Nova Zelândia e também em Hong Kong.

O procedimento adotado para o sistema de modelo hidrológico é baseado em diferenças finitas, onde o talude é dividido em uma série de colunas retangulares e

cada uma é dividida em células regulares. A Figura 34 ilustra uma representação deste modelo integrado.

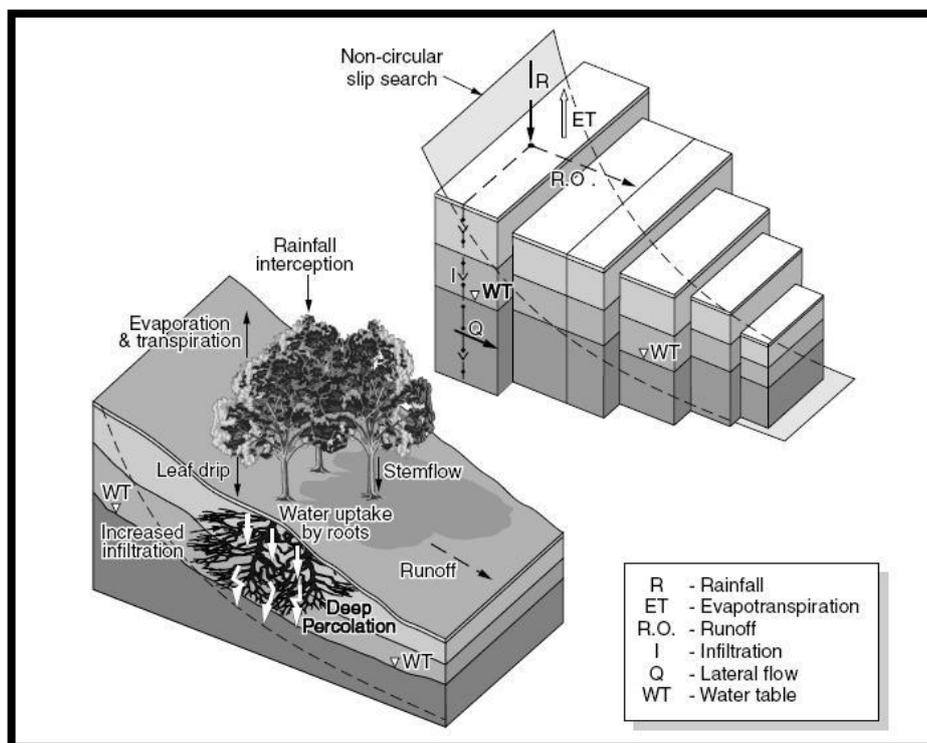


Figura 34 - Representação do modelo de estabilidade de talude hidrológico integrado (WILKINSON et al., 2002).

O modelo simula o armazenamento de água, a infiltração, a evaporação e os regimes de fluxo não-saturado e saturado. O fluxo vertical não-saturado é computado utilizando a equação de Richards (1931) em sua forma explícita (equação 34), e com a condutividade não-saturada sendo definida pelo procedimento de Millington-Quirk (1959).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial K}{\partial z}$$

Eq. 31

Sendo,  $\theta$  a umidade volumétrica,  $dt$  é o *time step*,  $z$  representa a profundidade vertical,  $K$  é a condutividade hidráulica não-saturada vertical, e  $\psi$  é a sucção mátrica. O fluxo entre colunas é modelado usando a equação de Darcy (1856) para fluxos saturados.

A equação que calcula o fator de segurança neste estudo é expressa por:

$$FS = \frac{\sum_{i=0}^n \{ (c' + c'_R)l + [P_v - (u - u_v)l] \tan \phi' \} \sec \alpha}{\sum_{i=0}^n (W + S_w) \tan \alpha} \quad \text{Eq. 32}$$

Sendo, FS o fator de segurança (*Factor of Safety*),  $c'$  a coesão efetiva,  $c'_R$  o aumento de coesão derivado da sobrecarga das raízes,  $l$  é o comprimento da base da fatia,  $P_v$  representa a força normal que atua perpendicularmente a base da fatia,  $u$  é a poro-pressão de água,  $u_v$  representa o efeito combinado da interceptação,  $\phi'$  é o ângulo de atrito interno efetivo,  $\alpha$  é o ângulo de inclinação da fatia,  $W$  o peso da fatia, e  $S_w$  a sobrecarga da vegetação.

#### 2.7.4 O modelo de Xie et al. (2004b)

Neste trabalho de Xie et al. (2004b) os autores apresentam um modelo de análise integrado de talude infinito que foi desenvolvido para avaliar a influência da infiltração na estabilidade superficial de taludes pelo método de talude infinito.

Os autores afirmam que a superfície de ruptura crítica, considerando um movimento raso, pode ocorrer em uma das três seguintes superfícies: na frente de umedecimento, no nível de água, e na interface do solo com a rocha.

O modelo de infiltração utilizado neste trabalho é o modelo de Green-Ampt (1911). O objetivo da utilização deste modelo para o cálculo do fator de segurança é

determinar a profundidade da frente de umedecimento ( $z_w$ ) (equação 40). Para qualquer tempo  $T$ , aplicando a Lei de Darcy, a capacidade de infiltração pode ser encontrada pelas equações 33 e 34:

$$f = K_s \left( \frac{z_w + \psi_f}{z_w} \right) = \frac{dFF}{dT} \quad \text{Eq. 33}$$

$$FF = z_w \nabla \theta_i = K_s T + \nabla \theta_i \psi_f \ln \left( 1 + \frac{FF}{\nabla \theta_i \psi_f} \right) \quad \text{Eq. 34}$$

Sendo,  $f$  a taxa de infiltração atual (m/h),  $FF$  a profundidade de infiltração acumulada (m),  $\psi_f$  os parâmetros de sucção do solo da frente de umedecimento de Green-Ampt (m),  $K_s$  a condutividade hidráulica saturada do solo (m/h),  $\nabla \theta_i$  o déficit de umidade ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ),  $T$  o tempo de intervalo (h),  $z_w$  a profundidade da frente de umedecimento (m).

As equações de 38 a 40 são utilizadas para calcular a profundidade da frente de umedecimento para uma determinada lâmina d'água (*ponding*) ( $z_p$ ), a infiltração acumulada para esta lâmina d'água ( $F_p$ ) e o tempo para formar a lâmina d'água (*ponding time*) ( $T_p$ ). Estas condições são para quando a intensidade da chuva ( $i$ ) é maior que a capacidade de infiltração do solo e o tempo de chuva maior que  $T_p$ .

$$z_p = \frac{K_s \psi_f}{i - K_s} \quad \text{Eq. 35}$$

$$F_p = z_p \nabla \theta_i = \frac{K_s \psi_f \nabla \theta_i}{i - K_s} \quad \text{Eq. 36}$$

$$T_p = \frac{F_p}{i} = \frac{K_s \psi_f \nabla \theta_i}{i (i - K_s)} \quad \text{Eq. 37}$$

Sendo,  $i$  a intensidade da chuva (m/h);  $T_p$  o tempo para a formação da lâmina d'água (h);  $F_p$  a infiltração acumulada para esta lâmina d'água (m);  $z_p$  a profundidade da frente de umedecimento para esta lâmina d'água (m).

A taxa de infiltração e a infiltração acumulada e sua profundidade da frente de umedecimento correspondente para qualquer tempo  $T$  pode ser calculada pelas equações seguintes:

$$FF = F_p + K_s(T - T_p) + \nabla\theta_i\psi_f \ln\left(\frac{FF + \nabla\theta_i\psi_f}{F_p + \nabla\theta_i\psi_f}\right) \quad \text{Eq. 38}$$

$$f = K_s \left(1 + \frac{\psi_f \nabla\theta_i}{FF}\right) \quad \text{Eq. 39}$$

$$z_w = \frac{FF}{\nabla\theta_i} \quad \text{Eq. 40}$$

Para o cálculo do fator de segurança pela teoria do equilíbrio-limite os autores elaboraram quatro modelos para avaliar a estabilidade das encostas para escorregamentos rasos.

**Modelo 1:** apenas os dados da superfície do terrenos são disponíveis. A descrição do modelo é apresentada na Figura 35, e neste caso, a potencial superfície de ruptura ocorre na frente de umedecimento. O fator de segurança é calculado pela equação 44 (CROSTA, 1997; CHO e LEE, 2002).

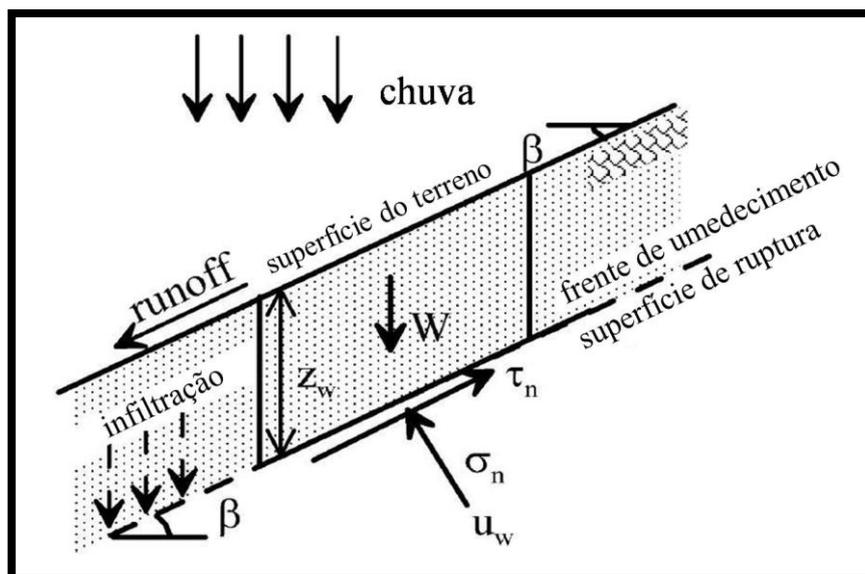


Figura 35 - Apenas os dados referentes a superfície do terreno são disponíveis (XIE et al., 2004b).

$$FS = \frac{c'_w + (\gamma_{sat} z_w \cos^2 \beta - u_w) \tan \phi'_w}{\gamma_{sat} z_w \sin \beta \cos \beta} \quad \text{Eq. 41}$$

**Modelo 2:** a profundidade do contato solo-rocha é conhecida. A descrição do modelo é apresentada na Figura 36, e neste caso, a potencial superfície de ruptura pode ocorrer tanto na frente de umedecimento quanto na interface do solo com a rocha. O fator de segurança pode ser calculado utilizando uma das equações seguintes (RAHARDJO et al., 1995; CROSTA, 1998).

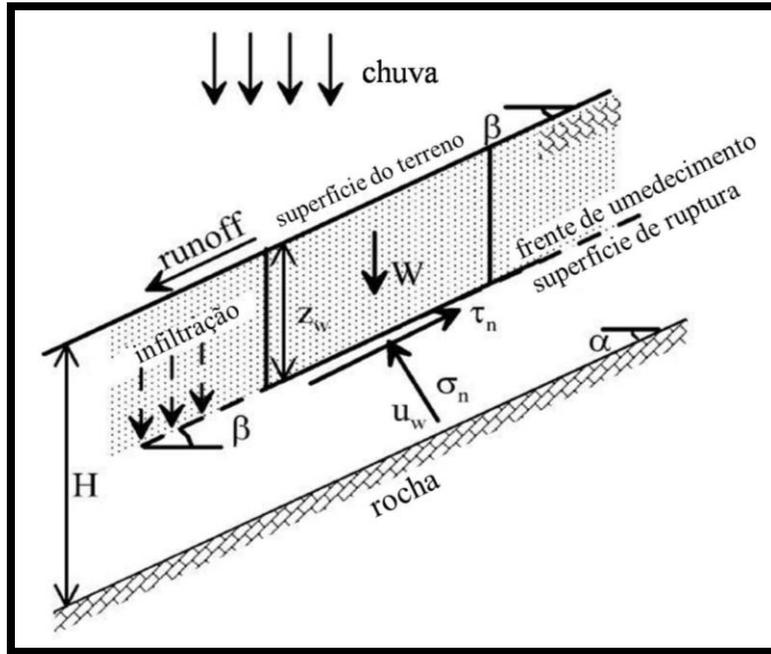


Figura 36 - A profundidade do contato solo-rocha é conhecida (XIE et al., 2004b).

Sendo a superfície de ruptura ao longo da frente de umedecimento com  $z_w <$

H:

$$FS = \frac{c'_w + (\gamma_{sat} z_w \cos^2 \beta - u_w) \tan \phi'_w}{\gamma_{sat} z_w \sin \beta \cos \beta} \quad \text{Eq. 42}$$

Sendo a superfície de ruptura ao longo do plano da rocha com  $z_w \geq H$ :

$$FS = \frac{c'_w + (\gamma_{sat} H \cos^2 \alpha - u_w) \tan \phi'_w}{\gamma_{sat} H \sin \alpha \cos \alpha} \quad \text{Eq. 43}$$

E para a superfície de ruptura ao longo do plano da rocha com  $z_w < H$ :

$$FS = \frac{c'_i + (\gamma_i H \cos^2 \alpha + FF \gamma_w \cos^2 \alpha) \tan \phi'_i}{(\gamma_i H + FF \gamma_w) \sin \alpha \cos \alpha} \quad \text{Eq. 44}$$

**Modelo 3:** a profundidade referente ao nível de água é conhecida. O modelo é ilustrado pela Figura 37, e para este caso, a potencial superfície de ruptura pode ocorrer tanto na frente de umedecimento quanto no nível de água. O fator de segurança é calculado utilizando as equações seguintes:

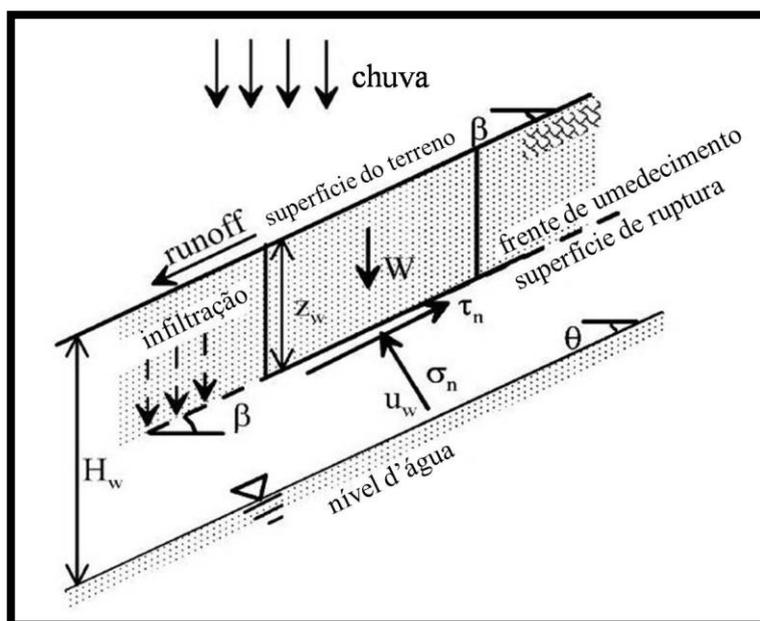


Figura 37 - A profundidade referente ao nível de água é conhecida (XIE et al., 2004b).

Para a superfície de ruptura ao longo da frente de umedecimento com  $z_w < H_w$ :

$$FS = \frac{c'_w + (\gamma_{sat} z_w \cos^2 \beta - u_w) \tan \phi'_w}{\gamma_{sat} z_w \sin \beta \cos \beta} \quad \text{Eq. 45}$$

Para a superfície de ruptura ao longo da frente de umedecimento com  $z_w \geq H_w$  (considerando um estado de saturação para todo o talude):

$$FS = \frac{c'_w + (\gamma_{sat} H_w \cos^2 \beta - H_w \gamma_w) \tan \phi'_w}{\gamma_{sat} H_w \sin \beta \cos \beta} \quad \text{Eq. 46}$$

Considerando a superfície de ruptura ao longo do nível d'água ( $z_w < H_w$ ):

$$FS = \frac{c'_w + (\gamma_i H_w \cos^2 \theta + FF \gamma_w \cos^2 \theta) \tan \phi'_w}{(\gamma_i H_w + FF \gamma_w) \sin \theta \cos \theta} \quad \text{Eq. 47}$$

Sendo a superfície de ruptura ao longo do nível d'água com  $z_w \geq H_w$  (considerando um estado de saturação para todo o talude):

$$FS = \frac{c'_w + (\gamma_{sat} H_w \cos^2 \theta + H_w \gamma_w) \tan \phi'_w}{\gamma_{sat} H_w \sin \theta \cos \theta} \quad \text{Eq. 48}$$

**Modelo 4:** ambas as informações sobre nível de água e profundidade da rocha estão disponíveis. Este modelo é ilustrado pela Figura 38, e neste caso a superfície de ruptura pode ocorrer em três diferentes condições: na frente de umedecimento, no nível d'água e no contato solo-rocha. O fator de segurança pode ser calculado através das equações seguintes:

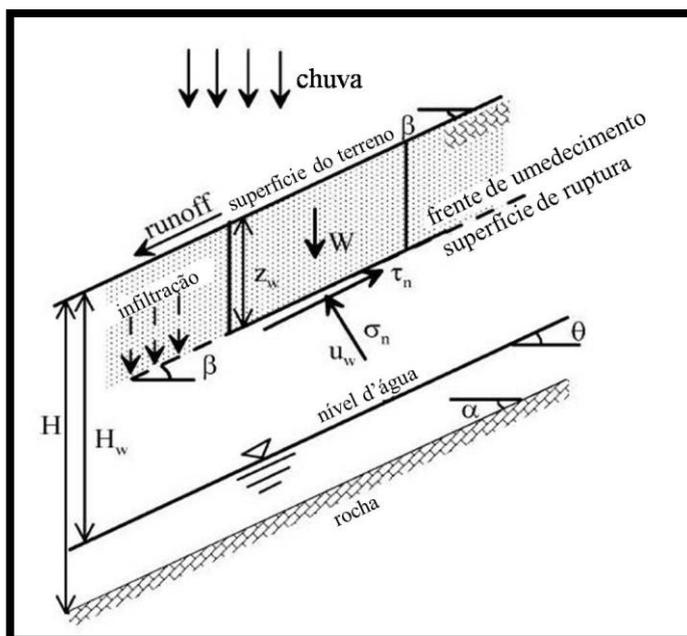


Figura 38 - As informações sobre nível d'água e profundidade da rocha são disponíveis (XIE et al., 2004b).

Para a superfície de ruptura ao longo da frente de umedecimento com  $z_w < H_w$ :

$$FS = \frac{c'_w + (\gamma_{sat} z_w \cos^2 \beta - u_w) \tan \phi'_w}{\gamma_{sat} z_w \sin \beta \cos \beta} \quad \text{Eq. 49}$$

Considerando a superfície de ruptura ao longo do nível d'água ( $z_w < H_w$ ):

$$FS = \frac{c'_w + (\gamma_i H_w \cos^2 \theta + FF \gamma_w \cos^2 \theta) \tan \phi'_w}{(\gamma_i H_w + FF \gamma_w) \sin \theta \cos \theta} \quad \text{Eq. 50}$$

Sendo a superfície de ruptura ao longo do nível d'água com  $z_w \geq H_w$  (considerando um estado de saturação para todo o talude):

$$FS = \frac{c'_w + (\gamma_{sat} H_w \cos^2 \theta + H_w \gamma_w) \tan \phi'_w}{\gamma_{sat} H_w \sin \theta \cos \theta} \quad \text{Eq. 51}$$

Para a superfície de ruptura ao longo do contato solo-rocha com  $z_w < H_w$ :

$$FS = \frac{c'_w + \{[\gamma_i H_w + \gamma_{sat} (H - H_w) + FF \gamma_w] \cos^2 \alpha - (H - H_w) \gamma_w\} \tan \phi'_w}{(\gamma_i H_w + \gamma_{sat} (H - H_w) + FF \gamma_w) \sin \alpha \cos \alpha} \quad \text{Eq. 52}$$

E para a superfície de ruptura ao longo do contato solo-rocha com  $z_w \geq H_w$  (é considerada a água subterrânea estática):

$$FS = \frac{c'_w + (\gamma_{sat} H \cos^2 \alpha - H \gamma_w) \tan \phi'_w}{\gamma_{sat} H \sin \alpha \cos \alpha} \quad \text{Eq. 53}$$

Sendo para todas essas equações:  $FS$  o Fator de Segurança;  $u_w$  a poro-pressão de água ( $\text{kN/m}^2$ );  $\gamma_{sat}$  o peso específico do solo saturado ( $\text{kN/m}^3$ );  $\gamma_i$  o peso específico inicial do solo ( $\text{kN/m}^3$ );  $\gamma_w$  o peso específico da água ( $\text{kN/m}^3$ );  $c'_w$  a coesão efetiva saturada do solo ( $\text{kN/m}^2$ );  $\phi'_w$  o ângulo de atrito efetivo saturado do solo ( $^\circ$ );  $c'_i$  a coesão efetiva inicial do solo ( $\text{kN/m}^2$ );  $\phi'_i$  o ângulo de atrito efetivo inicial do solo ( $^\circ$ );  $\beta$  o ângulo de inclinação da superfície do terreno ( $^\circ$ );  $\alpha$  o ângulo de inclinação da camada de rocha ( $^\circ$ );  $\theta$  o ângulo de inclinação do nível de água ( $^\circ$ );  $z_w$  a profundidade da frente de umedecimento (m);  $H_w$  a profundidade do nível de água (m);  $H$  a profundidade do topo rochoso (m).

Os autores aplicaram esta metodologia para determinação do hazard para escorregamentos em uma região ao sul do Japão (Figura 39).

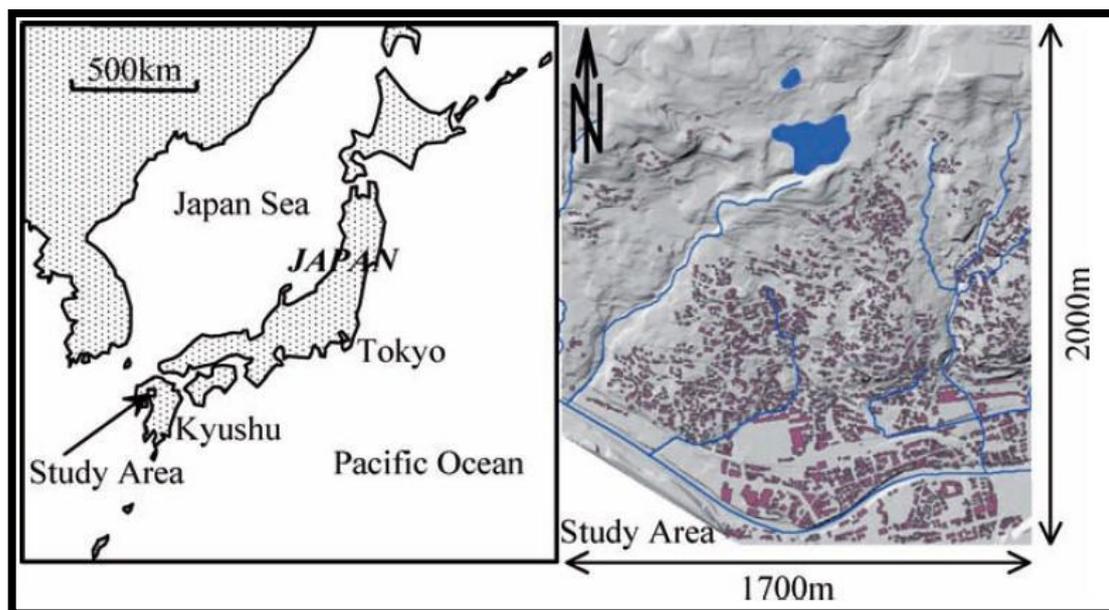


Figura 39 - Área de estudo do trabalho de Xie et al. (2004b).

Foi assumido um mesmo evento de chuva para toda a área e neste exemplo o fator de segurança foi calculado utilizando o modelo 1. A Figura 40 mostra seis diferentes mapas, onde o FS foi calculado para seis momentos diferentes de chuva. Pode ser observado que a chuva diminui o fator de segurança com o tempo. E a Figura 41 apresenta a distribuição ao longo do tempo os lugares onde o FS foi menor que 1,0 (um).

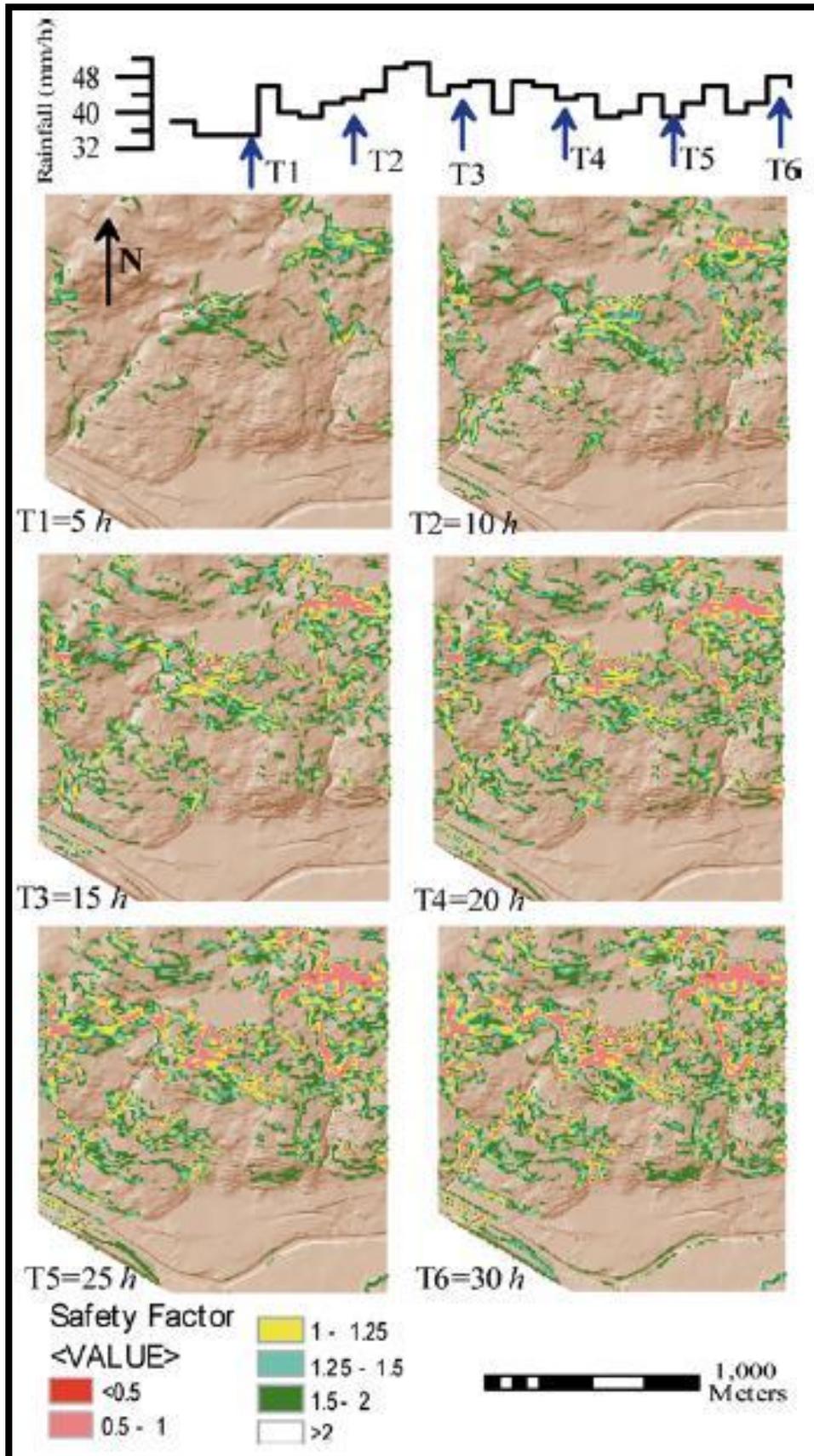


Figura 40 - Seis mapas de fator de segurança distribuídos ao longo do tempo (XIE et al., 2004b).

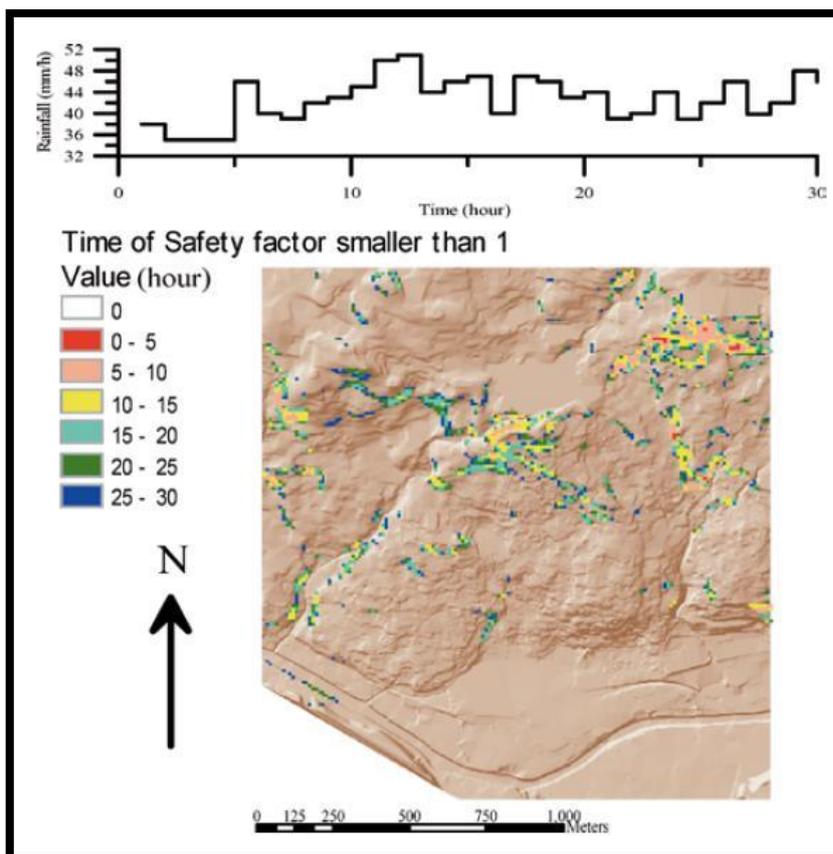


Figura 41 - A distribuição do tempo onde o fator de segurança é menor que um (XIE et al., 2004b).

### 2.7.5 O modelo de Xie et al. (2007a)

Xie et al. (2007) apresentou um trabalho similar ao de 2004, porém a análise de estabilidade de talude neste trabalho é tridimensional.

O modelo de infiltração continua sendo o de Green-Ampt (1911), assim como no trabalho de 2004, o objetivo da utilização deste modelo para o cálculo do fator de segurança é determinar a profundidade da frente de umedecimento ( $Z_f$ ), como é ilustrada pela Figura 42 de acordo com a Lei de Darcy, a taxa de infiltração é dada por:

$$f = K_s \frac{\psi_f + Z_f}{Z_f}$$

Eq. 54

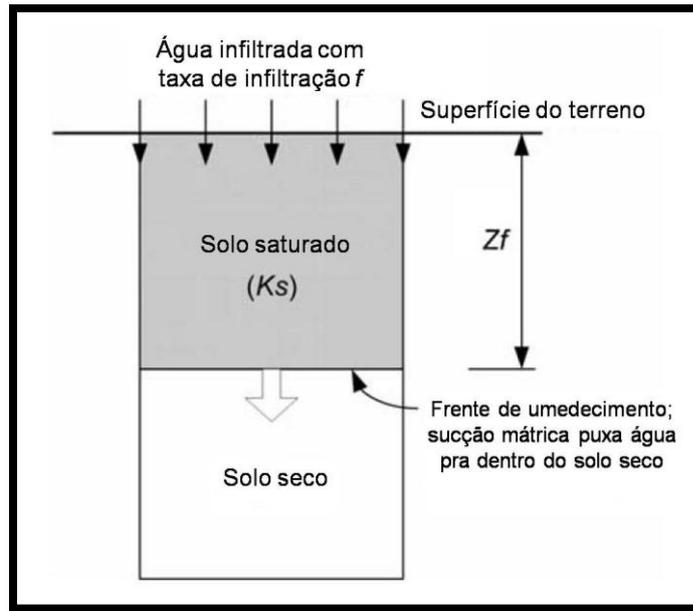


Figura 42 - Visão conceitual do modelo de infiltração de Green-Ampt.

A profundidade da frente de umedecimento pode ser relacionada com o volume acumulado de água infiltrado por:

$$F = Z_f(\theta_s - \theta_i) \quad \text{Eq. 55}$$

Substituindo  $Z_f$  da equação 58 na equação 57 temos que a taxa de infiltração para qualquer tempo  $t$  é:

$$f(t) = K_s + K_s \frac{\psi_f(\theta_s - \theta_i)}{F} \quad \text{Eq. 56}$$

A expressão de  $F(t)$  pode ser afirmada como:

$$t = t_p + \frac{1}{K_s} [F - F_p + \psi_f(\theta_s - \theta_i) \ln(n)] \quad \text{Eq. 57}$$

$$n = \frac{\psi_f(\theta_s - \theta_i) + F_P}{\psi_f(\theta_s - \theta_i) + F} \quad \text{Eq. 58}$$

$t_p$  e  $F_p$  pode ser calculados a partir das seguintes equações:

$$t_p = \frac{F_p}{P} \quad \text{Eq. 59}$$

$$F_p = \frac{\psi_f K_s (\theta_s - \theta_i)}{P - K_s} \quad \text{Eq. 60}$$

Sendo,  $f(t)$  a taxa de infiltração (m/h) no tempo  $t$  (h);  $K_s$  a condutividade do solo saturada (m/h);  $\psi_f$  a matriz de sucção da frente de umedecimento (m);  $Z_f$  a profundidade da frente de umedecimento (m);  $F$  a quantidade acumulada de água infiltrada (m);  $\theta_s$  a umidade volumétrica saturada do solo;  $\theta_i$  a umidade volumétrica inicial do solo;  $t_p$  o instante quando a água começa a acumular na superfície do solo (h);  $F_p$  a quantidade de água infiltrada antes de começar a acumular água na superfície do terreno (m);  $P$  a taxa de chuva (m/h).

Os autores utilizaram como base para a análise de estabilidade de taludes tridimensional o modelo utilizado Xie et al. (2003a) que é uma modificação do modelo original de Hovland (1977):

$$FS_{3D} = \frac{\sum_J \sum_I (cA + W \cos \theta \tan \phi) \cos \theta_{Avr}}{\sum_J \sum_I W \sin \theta_{Avr} \cos \theta_{Avr}} \quad \text{Eq. 61}$$

Sendo,  $FS_{3D}$  o fator de segurança tridimensional do talude;  $c$  a coesão (kN/m<sup>2</sup>);  $A$  a área da superfície de ruptura (m<sup>2</sup>);  $W$  o peso de uma coluna de solo

(kN);  $\phi$  o ângulo de atrito interno do solo ( $^{\circ}$ );  $\theta_{Avr}$  o ângulo entre a direção de movimento e o plano horizontal ( $^{\circ}$ );  $J, I$  são os números de linhas e colunas da célula do intervalo da massa instável.

Assim como no trabalho anterior, são apresentadas quatro diferentes situações (todas apresentando uma superfície de ruptura pré-definida) e para cada uma delas um modelo de cálculo de fator de segurança 3-D é proposto, como é apresentado a seguir:

**Modelo 1:** a superfície de ruptura se forma na zona não-saturada entre a frente de umedecimento que está avançando a partir da superfície do terreno e o nível d'água (Figura 43). Nesta situação a força resistente horizontal  $F_1$  e a força cisalhante horizontal  $F_2$  atuantes na superfície de ruptura podem ser calculadas a partir das equações 62 e 63.

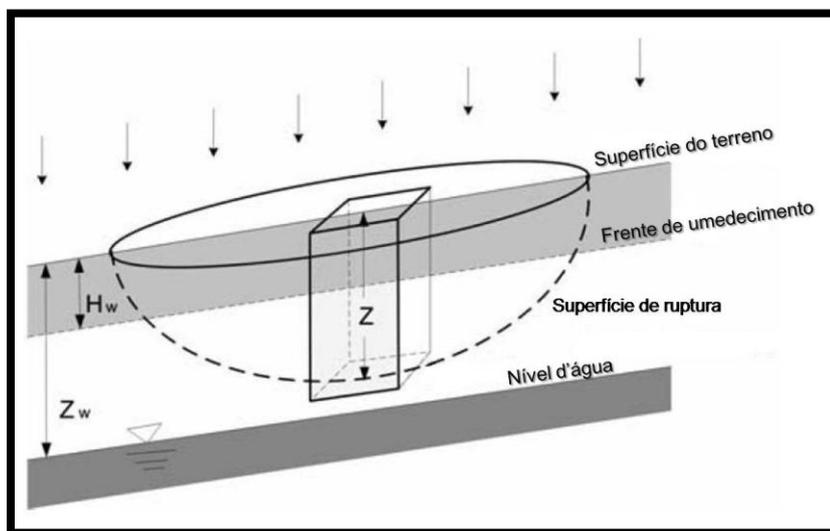


Figura 43 - Modelo 1: a superfície de ruptura se forma entre a frente de umedecimento e o nível d'água (XIE et al., 2007a).

$$F_1 = \{c'_i A' + [\gamma_i Z + (\gamma_{sat} - \gamma_i) H_w] A \cos \theta \tan \phi'\} \cos \theta_{avr}$$

Eq. 62

$$F_2 = [\gamma_i Z + (\gamma_{sat} - \gamma_i) H_w] A \sin \theta_{avr} \cos \theta_{avr} \quad \text{Eq. 63}$$

**Modelo 2:** a superfície de ruptura se forma na zona saturada entre a superfície do terreno e a frente de umedecimento, que está avançando a partir da superfície do terreno (Figura 44). Nesta situação a força  $F_1$  e a força  $F_2$  atuantes na superfície de ruptura podem ser calculadas a partir das equações 64 e 65.

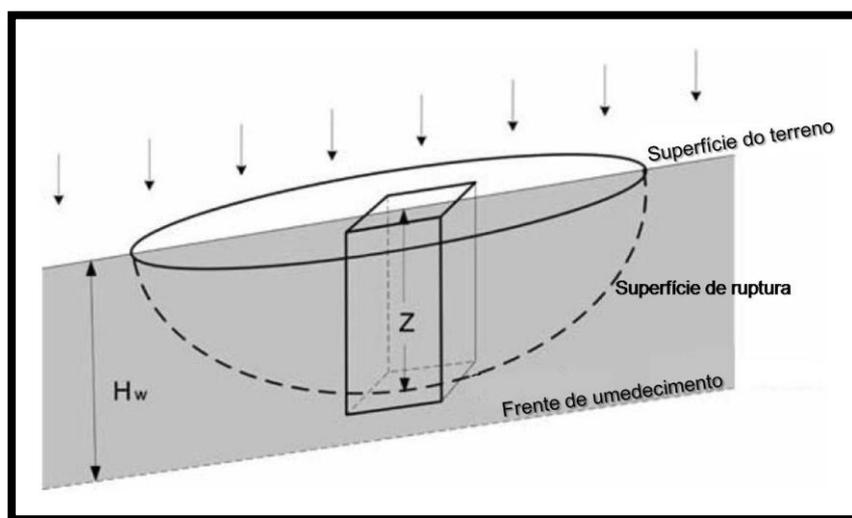


Figura 44 - Modelo 2: a superfície de ruptura se forma entre a superfície do terreno e a frente de umedecimento (XIE et al., 2007a).

$$F_1 = [c'_w A' + (\gamma_{sat} Z \cos \theta - \mu_w) A \tan \phi'] \cos \theta_{avr} \quad \text{Eq. 64}$$

$$F_2 = \gamma_{sat} Z A \sin \theta_{avr} \cos \theta_{avr} \quad \text{Eq. 65}$$

**Modelo 3:** a superfície de ruptura se forma na zona saturada abaixo do nível d'água e a frente de umedecimento atingiu o nível d'água (Figura 45). Neste caso a

força  $F_1$  e a força  $F_2$  atuantes na superfície de ruptura podem ser calculadas a partir das mesmas equações apresentadas para o modelo 2.

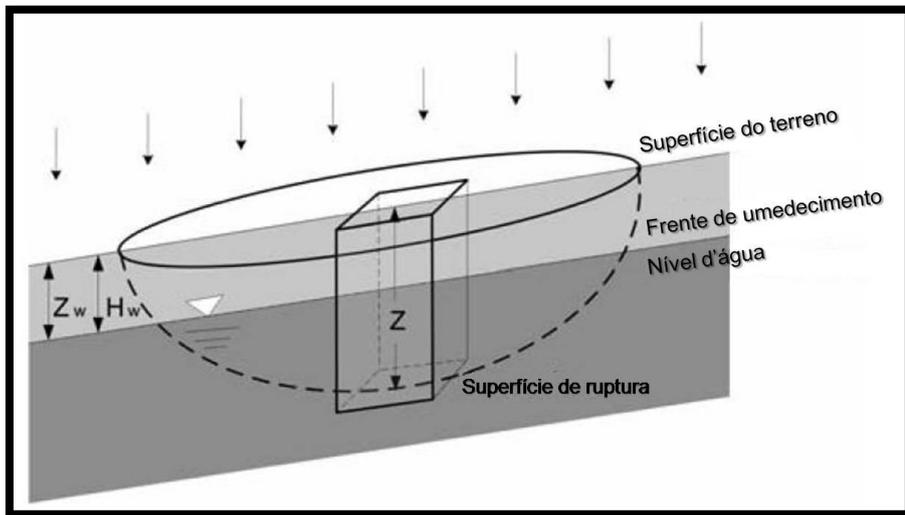


Figura 45 - Modelo 3: a superfície de ruptura se forma abaixo do nível d'água (XIE et al., 2007a).

**Modelo 4:** a superfície de ruptura se forma na zona saturada abaixo do nível de água e a zona não-saturada existe entre a frente de umedecimento e o nível de água. Neste caso  $F_1$  e  $F_2$  atuantes na superfície de ruptura podem ser calculados a partir das equações 66 e 67.

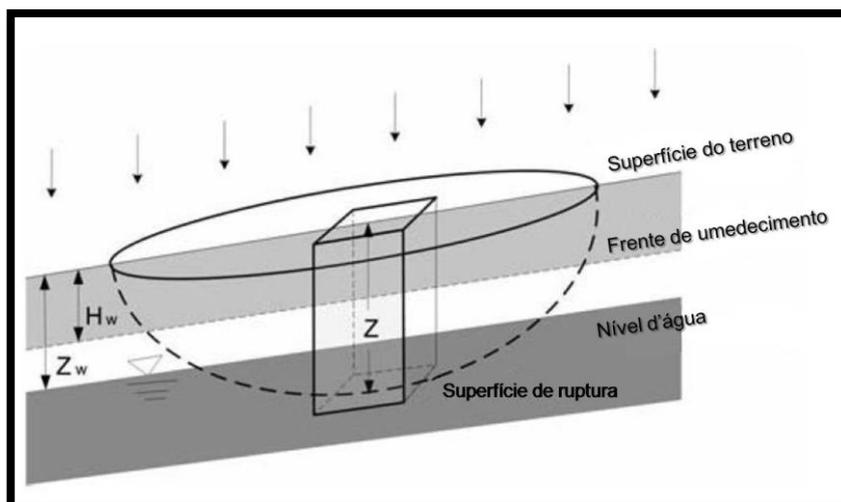


Figura 46 - Modelo 4: a superfície de ruptura abaixo do nível d'água e a zona não saturada existe (XIE et al., 2007a).

$$F_1 = \{c'_w A' + [\gamma_i (Z_w - H_w) + \gamma_{sat} (H_w + Z - Z_w) \cos \theta - \mu_w] A \tan \phi'\} \cos \theta_{avr} \quad \text{Eq. 66}$$

$$F_2 = [\gamma_i (Z_w - H_w) + \gamma_{sat} (H_w + Z - Z_w)] A \sin \theta_{avr} \cos \theta_{avr} \quad \text{Eq. 67}$$

Para as equações de 62 a 68, considera-se:  $F_1$  a força resistente horizontal (kN);  $F_2$  a força cisalhante horizontal (kN);  $\gamma_{sat}$  o peso específico do solo saturado ( $\text{kN}/\text{m}^3$ );  $\gamma_i$  o peso específico inicial do solo ( $\text{kN}/\text{m}^3$ );  $c'_i$  a coesão efetiva inicial do solo ( $\text{kN}/\text{m}^2$ );  $c'_w$  a coesão efetiva saturada do solo ( $\text{kN}/\text{m}^2$ );  $\phi'$  o ângulo de atrito interno efetivo do solo ( $^\circ$ );  $Z_w$  a profundidade do nível d'água (m);  $H_w$  a profundidade da frente de umedecimento (m);  $Z$  a profundidade da superfície de ruptura (m);  $\mu_w$  a poro pressão ( $\text{kN}/\text{m}^2$ );  $A$  a área da coluna de solo ( $\text{m}^2$ );  $A'$  a área da superfície de ruptura da coluna de solo ( $\text{m}^2$ );  $\theta$  o ângulo de mergulho da superfície de ruptura ( $^\circ$ );  $\theta_{avr}$  o ângulo de mergulho da principal direção de escorregamento ( $^\circ$ );  $J, I$  o número de linhas e colunas das células do intervalo da massa de ruptura do talude.

Assumindo que os lados verticais de cada coluna de solo não apresentam atrito semelhante ao modelo de Hovland (1977), o fator de segurança 3D pode ser calculado pelo somatório de  $F_1$  e  $F_2$  de todas as colunas de solo da massa de ruptura:

$$FS_{3D} = \frac{\sum_J \sum_I F_1}{\sum_J \sum_I F_2} \quad \text{Eq. 68}$$

Os autores aplicaram esta metodologia em uma região de uma rodovia no Japão e assumiram um evento de chuva com duração de 10 horas com intensidade de 8 cm/h. Seis mapas de fator de segurança ao longo do tempo foram gerados (Figura 47).

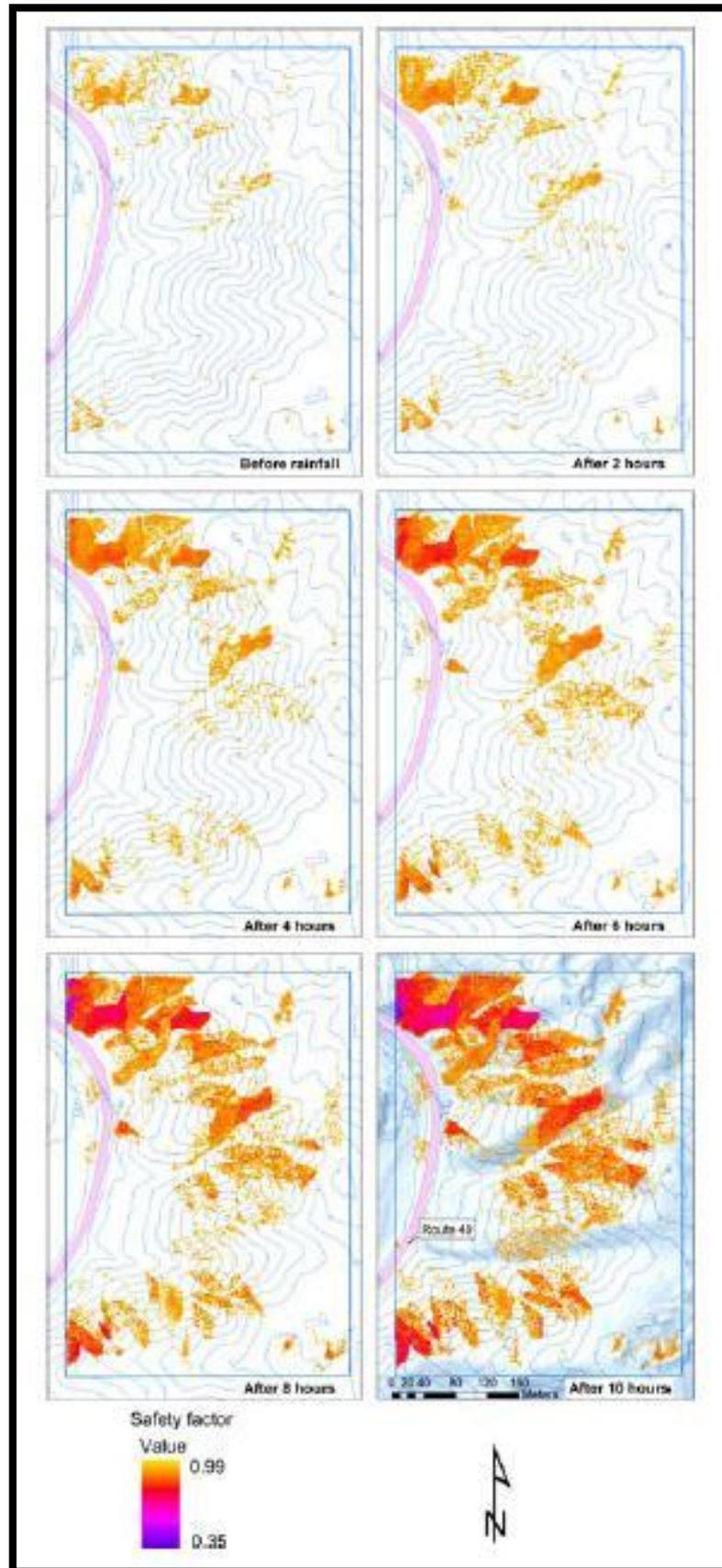


Figura 47 - Distribuição de mapas de fator de segurança ao longo tempo (XIE et al., 2007a).

Além disso, os autores aplicaram a metodologia proposta em 2004 nesta mesma área sob as mesmas condições e apresentaram um gráfico de fator de segurança com a profundidade, onde é possível observar que a análise 1-D é mais conservadora que a análise tridimensional (Figura 48).

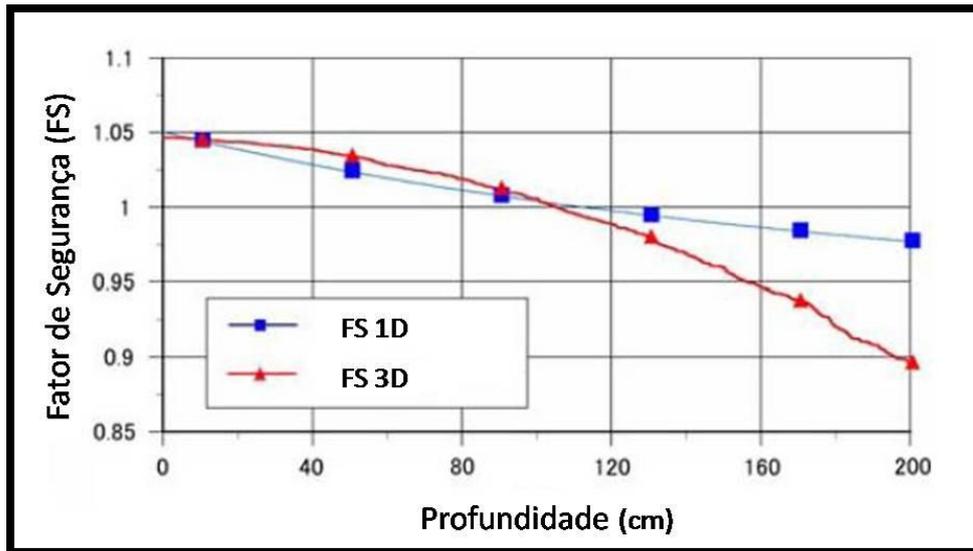


Figura 48 - Variação dos fatores de segurança 1D e 3D com a profundidade (XIE et al., 2007a).

### 3 METODOLOGIA

As atividades desenvolvidas neste trabalho encontram-se em forma esquemática no fluxograma da Figura 49, e são enquadradas em 12 etapas, a saber:

- 1 – Revisão bibliográfica;
- 2 - Caracterização básica da área de estudo;
- 3 – Caracterização dos materiais inconsolidados e das suas propriedades hidráulicas;
- 4 - Escolha da(s) superfície(s) de ruptura potencial(is);
- 5 - Análise dos dados pluviográficos;
- 6 - Modelo de infiltração – HYDRUS 1D;
- 7 – Determinação do peso específico médio;
- 8 - Escolha dos valores de parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito);
- 9 - Definição do tamanho dos grids regulares e caracterização detalhada da área de estudo;
- 10 - Obtenção do cálculo de fator de segurança tridimensional;
- 11 - Análise dos resultados;
- 12 - Elaboração da dissertação.



Figura 49 - Fluxograma esquemático das atividades desenvolvidas.

### **3.1 Etapa 1 – Revisão Bibliográfica**

A primeira fase do trabalho é constituída pela revisão bibliográfica. Nesta etapa inicial foi realizada uma extensa pesquisa sobre estabilidade de encostas, incluindo a pesquisa de classificações de movimentos de massa gravitacionais e mecanismos associados até a utilização de modelos de infiltração para a análise de estabilidade.

### **3.2 Etapa 2 – Caracterização Básica da Área de Estudo**

Nesta etapa do trabalho foi realizado um estudo de caracterização básica da área. A partir do mapa topográfico, em escala 1:500, realizam-se as primeiras observações sobre aspectos fisiográficos. Informações sobre geologia, relevo e aspectos climáticos são consideradas.

### **3.3 Etapa 3 – Caracterização dos Materiais Inconsolidados**

Tanto o mapa topográfico quanto as informações referentes aos materiais inconsolidados (índices físicos, parâmetros de resistência, condutividade hidráulica saturada, assim como o próprio mapa de materiais inconsolidados) da área foram compilados do trabalho de Ahrendt (2005).

A partir do trabalho de Ahrendt (2005) obteve-se as características de todos os tipos de materiais inconsolidados da área e os perfis típicos existentes (Unidades de materiais inconsolidados).

### **3.4 Etapa 4 – Definição da(s) Superfície(s) de Ruptura Potencial(s)**

Esta fase é uma das etapas de maior importância para o trabalho, pois define-se a superfície de ruptura potencial que será aplicada a metodologia de avaliação de estabilidade.

Esta definição é realizada em função principalmente dos aspectos geomórficos da área, sendo considerado o tipo de encosta, a declividade e a direção das vertentes, e, além disso, também foi considerado a variabilidade de materiais inconsolidados e tamanho da área.

### **3.5 Etapa 5 – Análise de Dados Pluviográficos**

A análise dos dados de chuva é uma etapa fundamental no trabalho, pois o(s) evento(s) de chuva(s) escolhido(s) será utilizado como dado de entrada no modelo de infiltração da fase seguinte. Além da escolha do evento pluviográfico nesta fase será calculada a probabilidade temporal deste evento ocorrer.

No estudo das precipitações ou de outra variável hidrológica, envolvendo a análise estatística de um conjunto de dados ou de um processo estocástico, pode-se dispor de várias distribuições teóricas de probabilidades. A distribuição de probabilidade que melhor se aplica ao problema considerado é a distribuição de Poisson.

Uma das propriedades da distribuição de Poisson diz que a probabilidade de ocorrência de um evento é a mesma para quaisquer dois intervalos de tempo, sendo estatisticamente independentes.

A função distribuição de  $T_1$  que no processo de Poisson pode ser considerado como o tempo de recorrência do evento desejado é expressa pela equação a seguir:

$$F_{T_1}(t) = P(T_1 \leq t) = 1 - e^{-vt} \quad \text{Eq. 69}$$

Sendo,  $t$  o tempo considerado para o cálculo da probabilidade,  $v$  taxa de ocorrência média, e a base neperiana. A taxa de ocorrência média é encontrada simplesmente pela relação entre o número de eventos ocorridos pelo tempo considerado.

### **3.6 Etapa 6 – Modelo de Infiltração**

Os estudos sobre escorregamentos rasos mostraram que estes são resultados da infiltração da água no perfil de materiais geológicos, assim na previsão de estabilidade de talude devem ser considerados modelos conceituais e físicos que simulem os processos hidrogeológicos e geotécnicos transientes responsáveis pela estabilidade do mesmo.

Existem diversos modelos, dos mais simples aos mais complexos, que são formulados com base nas características hidrológicas e geotécnicas dos materiais geológicos a fim de avaliar o processo de infiltração. Além das informações referentes aos materiais geológicos a intensidade e duração do evento pluviométrico são essenciais para esta avaliação, pois são características importantes que alteram a umidade, e são influenciados pela umidade pretérita e chuvas antecedentes.

A adoção de um modelo de infiltração visa a determinação de umidades volumétricas: a umidade volumétrica média ( $\theta_M$ ) do perfil de solo considerado e a

umidade volumétrica de uma profundidade específica ( $\theta(z)$ ) desejada, após um evento chuvoso. Para atender a estes objetivos foi utilizado o programa HYDRUS 1D versão 3.0 (SIMUNEK et al., 2005).

O modelo HYDRUS 1D é um modelo numérico em diferenças finitas, para simulação unidirecional do fluxo de água, calor e múltiplos solutos em meios saturados ou não-saturados. O programa soluciona numericamente as equações de Richards para o fluxo variável da água no solo e equações de advecção e dispersão para calor e transporte de solutos (SIMUNEK et al., 1998). O modelo HYDRUS 1D permite o uso de três diferentes modelos analíticos para estimativa das propriedades hidráulicas  $\theta(h)$  e  $K(h)$  - curva de retenção e curva característica, respectivamente. Dentre os modelos disponíveis pode-se citar: Brooks e Corey (1964); van Genuchten (1980) e Vogel e Cislárová (1988). O modelo utilizado neste trabalho é o de van Genuchten (1980) que é baseado na distribuição estatística de poros de Mualem (1976) a fim de obter uma equação de estimativa em função da condutividade hidráulica não saturada em termos de retenção de água no solo. As expressões estabelecidas por van Genuchten (1980) são:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h > 0 \\ \theta_s & h \leq 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 70}$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad \text{Eq. 71}$$

Considerando,

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{Eq. 72}$$

$$m = 1 - 1/n \quad n > 1 \quad \text{Eq. 73}$$

Sendo,  $\theta$  a umidade volumétrica [ $L^3L^{-3}$ ],  $h$  a sucção [ $M/LT^2$ ],  $\theta_s$  a umidade volumétrica saturada [ $L^3L^{-3}$ ],  $\theta_r$  a umidade volumétrica residual [ $L^3L^{-3}$ ],  $\alpha$  o valor inverso da entrada de ar [ $L^{-1}$ ],  $K$  condutividade hidráulica [ $LT^{-1}$ ],  $K_s$  condutividade hidráulica saturada [ $LT^{-1}$ ],  $S_e$  a saturação efetiva [-],  $n$  e  $m$  são parâmetros de forma [-],  $l$  o parâmetro de conectividade entre poros [-]. Os parâmetros  $\alpha$ ,  $n$  e  $l$  são considerados muitas vezes fatores empíricos relacionados à forma dos solos que afetam a formação das funções hidráulicas.

São requeridos como dados de entrada pelo programa: profundidade do perfil de solo [ $L$ ]; tempo de simulação [ $T$ ]; valores de precipitação [ $L$ ]; umidade volumétrica inicial do solo [ $L^3L^{-3}$ ]; umidade volumétrica residual do solo [ $L^3L^{-3}$ ]; umidade volumétrica saturada do solo [ $L^3L^{-3}$ ]; condutividade hidráulica saturada do solo [ $LT^{-1}$ ], além dos parâmetros de van Genutchen  $\alpha$  [ $L^{-1}$ ],  $n$  [-] e  $l$  [-].

É realizada a simulação considerando um evento de chuva para cada Unidade de material inconsolidado. Além do resultado desejado (o perfil  $z \times \theta$ ) outros resultados também são gerados tais como perfis de: infiltração [ $L/T$ ] x tempo [ $T$ ], infiltração acumulada [ $L$ ] x tempo [ $T$ ], tensão de sucção [ $L$ ] x tempo [ $T$ ], fluxo *run-off* [ $L/T$ ] x tempo [ $T$ ], fluxo *run-off* acumulado [ $L$ ] x tempo [ $T$ ] e armazenamento de água no solo [ $L$ ] x tempo [ $T$ ]. Um exemplo de um perfil de profundidade x umidade volumétrica é apresentado na Figura 50 a seguir.

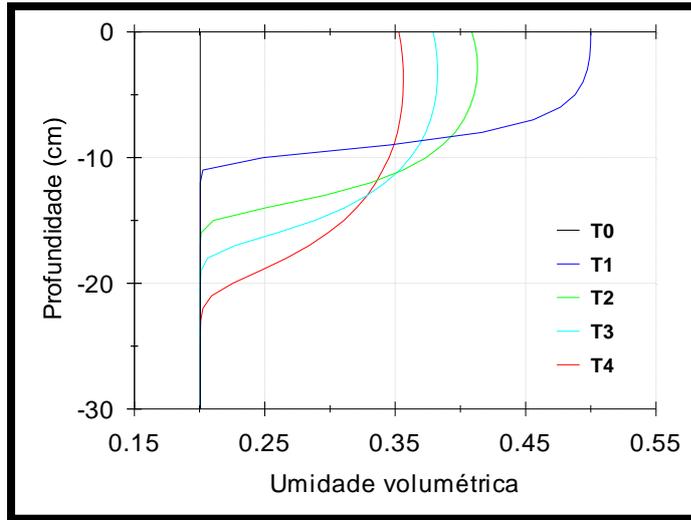


Figura 50 - Exemplo de uma curva  $\theta$  x  $z$  gerada pelo modelo HYDRUS 1D.

### 3.7 Etapa 7 – Determinação do Peso Específico Médio

A partir dos dados de umidade volumétrica média,  $\theta_M$ , obtido na etapa anterior, juntamente com informações sobre o peso específico do solo seco ( $\gamma_d$ ) e peso específico da água ( $\gamma_w$ ) de cada material, através de correlações de índices físicos obtêm-se o peso específico médio correspondente, que será utilizado no cálculo do fator de segurança 3-D. As equações de índices físicos utilizadas nesta etapa são:

$$\theta = w \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad \text{Eq. 74}$$

$$w = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1 \quad \text{Eq. 75}$$

Sendo,  $\theta$  a umidade volumétrica [ $L^3L^{-3}$ ];  $w$  a umidade gravimétrica [ $L^3L^{-3}$ ];  $\gamma_d$  o peso específico do solo seco [ $ML^{-2}T^{-2}$ ];  $\gamma_w$  o peso específico da água [ $ML^{-2}T^{-2}$ ];  $\gamma$  o peso específico do solo [ $ML^{-2}T^{-2}$ ].

### 3.8 Etapa 8 – Obtenção dos Valores de Parâmetros de Resistência

No cálculo do fator de segurança será utilizado a coesão e o ângulo de atrito da profundidade da superfície de ruptura. Foi realizada uma correlação entre os valores máximo e mínimo destes parâmetros em relação ao grau de saturação ( $S_r$ ) do ponto em questão (a profundidade desejada).

Com o valor da umidade volumétrica da profundidade  $z$  -  $\theta(z)$ , e da porosidade ( $n$ ) do respectivo material inconsolidado, por correlações de índices físicos (eq. 76) obtém-se o grau de saturação daquele ponto.

$$S_r(\%) = \frac{\theta_z}{n} \times 100 \quad \text{Eq. 76}$$

Foi estabelecida uma relação linear do ângulo de atrito e da coesão com o grau de saturação ( $S_r$ ), da seguinte forma: para um grau de saturação igual a zero foi considerado o valor mínimo de ângulo de atrito ( $\phi$ ) e o valor máximo de coesão ( $c$ ) do material inconsolidado correspondente (dados compilados de Ahrendt, 2005), condições características de um solo não saturado; para um grau de saturação igual a 100%, foram considerados os valores de ângulo de atrito e coesão na condição saturada,  $\phi_s$  e  $c_s$  respectivamente (dados de Ahrendt, 2005).

A relação linear adotada deve-se a dois aspectos, o primeiro relativo a quantidade de dados existentes e o segundo por ser uma variação que não afeta o valor do  $FS_{3D}$  por faixa de valores.

### **3.9 Etapa 9 – Definição do Tamanho dos Grids Regulares e Caracterização Detalhada da Área de Estudo**

Tendo em consideração o tamanho da área, o volume de informações necessárias e a viabilidade de cálculo, para este estudo foi definido que o tamanho dos grids regulares a serem utilizados na análise é de 10m de lado, ou seja, cada grid possui 100m<sup>2</sup>.

Para cada grid foi calculado a declividade e a direção de mergulho correspondente e, além disso, foi identificado a(s) Unidade(s) de material(is) inconsolidado(s) que constitui o grid. As curvas de níveis do mapa topográfico são eqüidistantes de metro em metro.

### **3.10 Etapa 10 – Fator de Segurança Tridimensional (FS<sub>3D</sub>)**

As superfícies de ruptura possuem geometria tridimensional (3-D), que varia no espaço mesmo em uma distância pequena. Por isso, destaca-se a utilização da análise da estabilidade de talude. Como foi visto no item **2.5 Análise Tridimensional de Estabilidade de Talude** desde o final da década de 1960 diversos modelos de análise 3-D têm sido propostos na literatura geotécnica.

O modelo de análise tridimensional de estabilidade de talude por análise de coluna proposto por Hovland (1977) foi modificado por Xie et al. em diversos trabalhos (2003a,b,c; 2004; 2006a,b,c; 2007). Dentre os aspectos gerais sobre o modelo foram mantidas como no trabalho original de Hovland (1977), pois assume-se que a coluna de solo (representação análoga a fatia na análise 2D) é pequena o suficiente de forma que todas as suas faces podem ser consideradas como linhas

retas; o topo da superfície da coluna pode ser irregular, mas isto é considerado relativamente não importante para a análise; e a profundidade da coluna  $z$  é simplesmente calculada como aproximadamente a partir do centro da face inferior (superfície de ruptura). Uma visualização tridimensional de uma coluna de solo é apresentada na Figura 51.

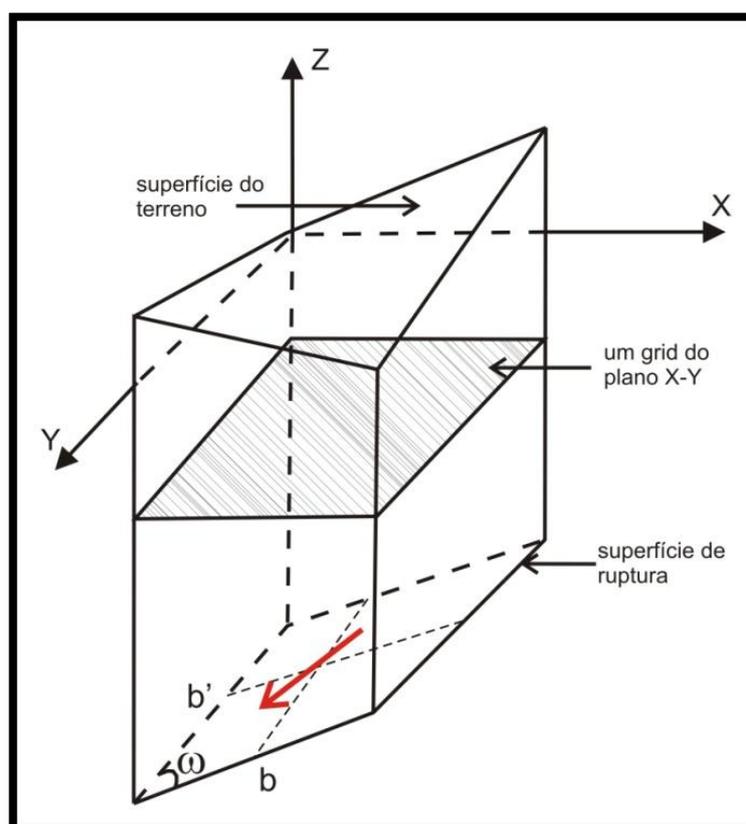


Figura 51 - Visualização 3-D de uma coluna de solo (adaptado de HOVLAND, 1977).

Todas as forças resistentes e cisalhantes devem se referir à possível direção de escorregamento, e não para a direção do eixo-y como é utilizado no modelo original de Hovland (1977). A principal direção de mergulho da área é assumida como sendo a possível direção de mergulho. No caso da superfície de ruptura ser desconhecida, a principal direção de mergulho da unidade de talude será o valor da moda da função de distribuição normal dos valores de direção de mergulho de todos

os grids do intervalo considerado, mas se a superfície de ruptura for conhecida, a principal direção de mergulho é calculada baseada na disposição da superfície de ruptura.

A interseção dos eixos cartesianos com o vértice inferior da superfície de ruptura é ilustrada na Figura 52 e com referência a esta figura as equações seguintes podem ser deduzidas.

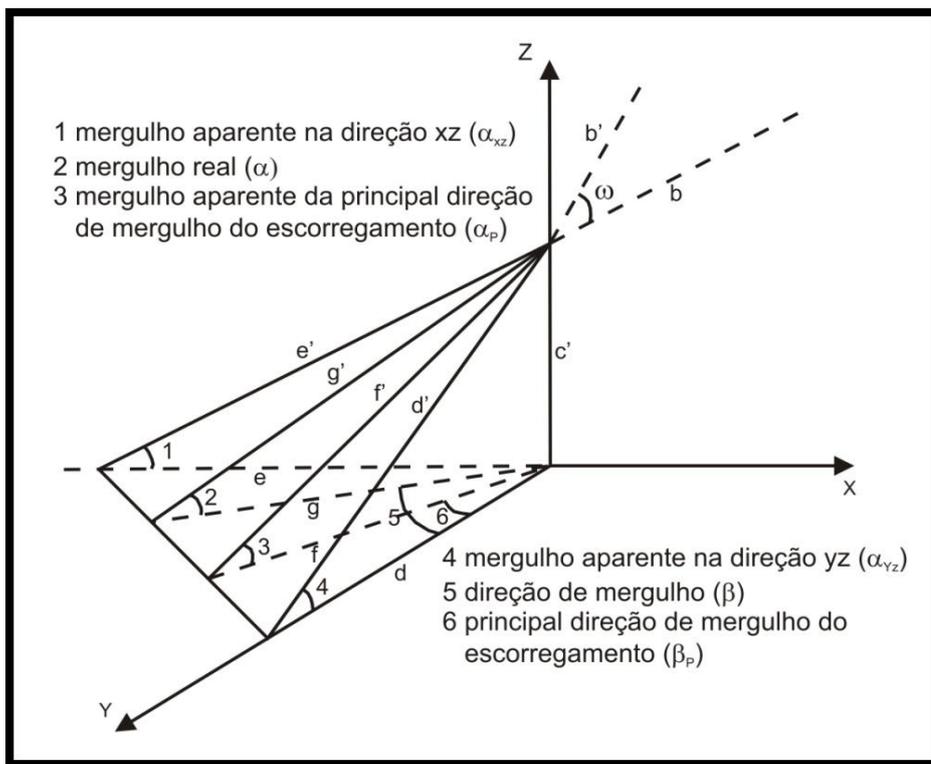


Figura 52 - Visão tridimensional da porção inferior da superfície de ruptura da coluna de solo (XIE, 2003 adaptado de HOVLAND, 1977)

$$A = ab \sin \omega \quad \text{Eq. 77}$$

$$c' = g \tan \alpha \quad \text{Eq. 78}$$

$$d = \frac{g}{\cos \beta} \quad \text{Eq. 79}$$

$$\cos \omega = \sin \alpha_{xz} \sin \alpha_{yz} \quad \text{Eq. 80}$$

Subseqüentemente, os mergulhos aparentes dos eixos x e y podem ser derivados:

$$\tan \alpha_{xz} = \tan \alpha \sin \beta \quad \text{Eq. 81}$$

$$\tan \alpha_{yz} = \tan \alpha \cos \beta \quad \text{Eq. 82}$$

Tendo que,

$$b = \frac{\text{taman ho do grid}}{\cos \alpha_{xz}} \quad \text{Eq. 83}$$

$$b' = \frac{\text{taman ho do grid}}{\cos \alpha_{yz}} \quad \text{Eq. 84}$$

A área da superfície de ruptura de uma coluna grid é

$$A = \text{tamanho do grid}^2 \left[ \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_{xz} \sin^2 \alpha_{yz}}}{\cos \alpha_{xz} \cos \alpha_{yz}} \right] \quad \text{Eq. 85}$$

O mergulho aparente da principal direção de mergulho da área de escorregamento pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$\tan \alpha_p = \tan \alpha |\cos(\beta - \beta_p)| \quad \text{Eq. 86}$$

Desta forma, o Fator de Segurança 3D do intervalo considerado pode ser expresso pelo equilíbrio da direção de escorregamento horizontal (XIE et al., 2003):

$$FS_{3D} = \frac{\sum_J \sum_I \{c' A + [(Z_{ji} - z_{ji})\gamma' \cos \alpha - \mu_{ji}] \tan \phi\} \cos \alpha_P}{\sum_J \sum_I (Z_{ji} - z_{ji}) \gamma' \sin \alpha_P \cos \alpha_P} \quad \text{Eq. 87}$$

Sendo,  $FS_{3D}$  é o Fator de Segurança 3D,  $c'$  a coesão efetiva ( $\text{kN/m}^2$ ),  $A$  a área da superfície de ruptura ( $\text{m}^2$ ),  $Z_{ji}$  a elevação da superfície do terreno (m),  $z_{ji}$  a elevação da superfície de ruptura (m),  $\gamma'$  é a unidade de peso ( $\text{kN/m}^3$ ),  $\alpha$  o ângulo de mergulho da superfície de ruptura ( $^\circ$ ),  $\mu_{ji}$  a pressão d'água na superfície de ruptura ( $\text{kN/m}^2$ ),  $\phi$  o ângulo de atrito ( $^\circ$ ),  $\alpha_P$  o ângulo de mergulho da principal direção de escorregamento ( $^\circ$ ),  $J, I$  o número de linhas e colunas das células do intervalo da massa de ruptura do talude.

### 3.10.1 Fator de segurança tridimensional e modelo hidrológico

Como foi visto no capítulo de revisão bibliográfica em diversas situações, principalmente se tratando de escorregamentos rasos, observa-se que a ruptura do talude está associada ao avanço da frente de umedecimento ao invés da elevação do nível d'água (NG et al., 2001; CHO e LEE, 2002; KIM et al., 2004; AHRENDT, 2005; XIE et al., 2007)

A frente de umedecimento causa uma redução na sucção do solo e um aumento do peso de solo por unidade de volume. Isto resulta num processo em que a força de resistência do solo diminui enquanto que a tensão total aumenta, até que ocorra a ruptura em uma potencial superfície de ruptura, ou seja, onde o equilíbrio entre as forças não pôde ser sustentada (XIE et al., 2007).

Sob essas condições, o modelo para o cálculo do Fator de Segurança 3-D modificado de Xie (2007) que foi utilizado no trabalho é:

$$FS_{3D} = \frac{\sum_I \sum_J cA + [\gamma_i(Z_{ij} - z_{ij}) + (\gamma_M - \gamma_i)(Z_{ij} - z_{ij})]a^2 \cos \alpha \tan \phi}{\sum_I \sum_J [\gamma_i(Z_{ij} - z_{ij}) + (\gamma_M - \gamma_i)(Z_{ij} - z_{ij})]a^2 \tan \alpha_P} \quad \text{Eq. 88}$$

Sendo,  $FS_{3D}$  é o Fator de Segurança 3D,  $c$  a coesão total ( $\text{kN/m}^2$ ),  $A$  a área da superfície de ruptura ( $\text{m}^2$ ),  $Z_{ij}$  a elevação da superfície do terreno (m),  $z_{ij}$  a elevação da superfície de ruptura (m),  $\gamma_M$  o peso específico médio do solo ( $\text{kN/m}^3$ ),  $\gamma_i$  peso específico inicial do solo ( $\text{kN/m}^3$ ),  $a$  o tamanho do grid (m),  $\alpha$  o ângulo de mergulho da superfície de ruptura ( $^\circ$ ),  $\phi$  o ângulo de atrito total ( $^\circ$ ),  $\alpha_P$  o ângulo de mergulho da principal direção de escorregamento ( $^\circ$ ),  $J, I$  o número de linhas e colunas das células do intervalo da área de ruptura do talude.

### 3.11 Etapa 11 – Análise de Resultados

Os resultados encontrados na fase anterior são apresentados sob a forma de tabelas e mapas, sendo utilizado o programa AutoCAD para a confecção dos mapas. Todos os resultados foram analisados, assim como foi realizada uma análise crítica do método proposto. Com estas análises foi possível tecer algumas conclusões a respeito da sua precisão e aplicabilidade e do comportamento das encostas frente a diferentes tipos de eventos de chuva.

### **3.12 Etapa 12 – Elaboração da Dissertação**

A última etapa de trabalho desta pesquisa consiste na elaboração deste documento.

## **4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA**

### **4.1 Aspectos Gerais**

#### **4.1.1 Localização**

Esta área foi objeto de estudo de AHRENDT (2005) com o trabalho de doutorado: “Movimentos de massa gravitacionais – Proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP” e a área de estudo desta pesquisa localiza-se no perímetro urbano da cidade de Campos do Jordão, a leste da capital de São Paulo (Figura 53) e está entre as coordenadas UTM 438.010/438.330W e 7.485.390/7.485.110S, abrangendo aproximadamente 90.000 m<sup>2</sup>.

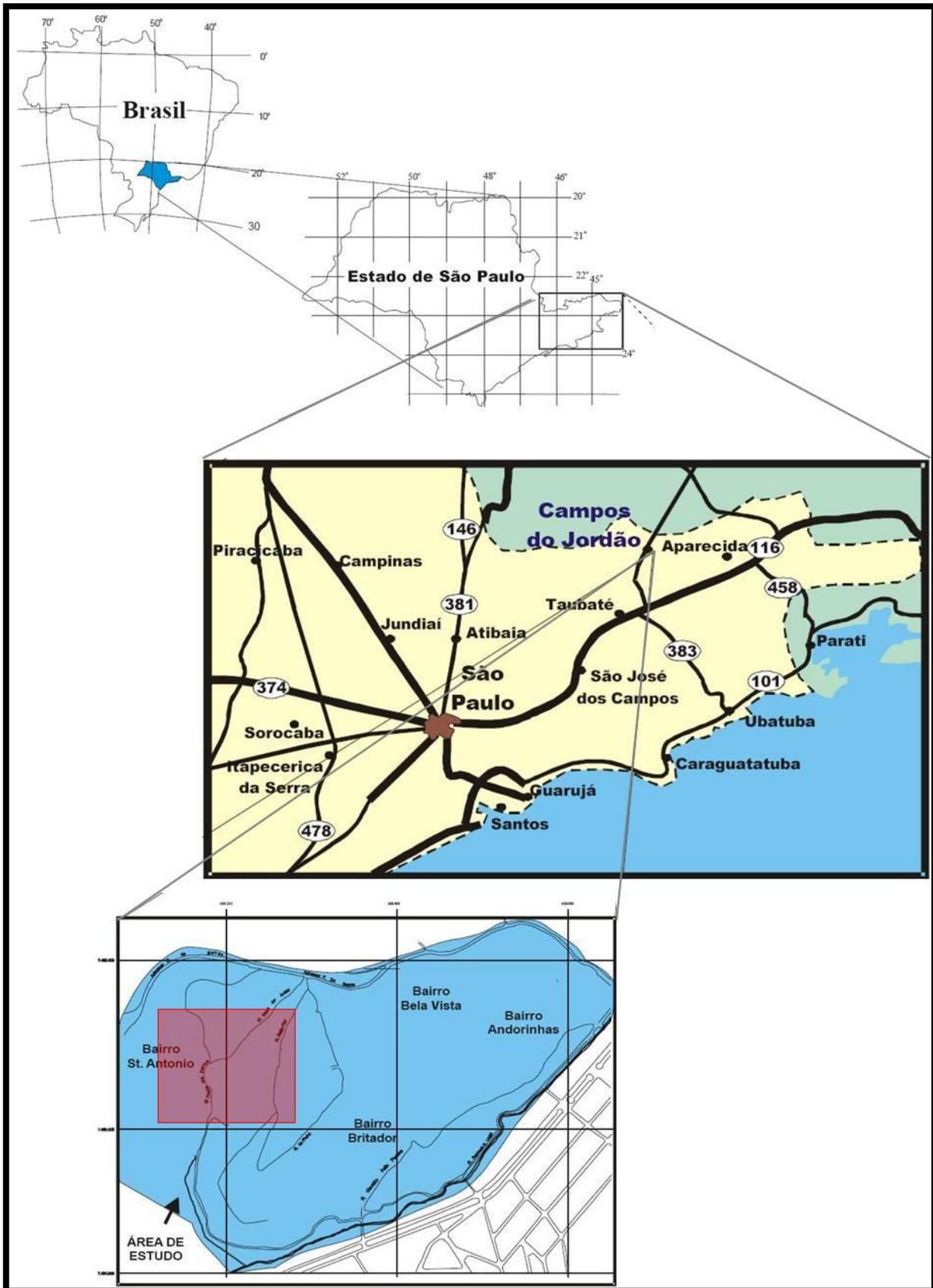


Figura 53 - Localização da área de estudo. A região rachurada em vermelho corresponde a área de estudo.

Na Figura 54 a seguir é possível observar a região da área de estudo.



Figura 54 – Visão geral do relevo da região em que está inserida a área de estudo (fotografia aérea de 1973, escala 1:10.000).

#### 4.1.2 Geologia

A área de estudo, mais especificamente, é constituída em sua totalidade por rochas migmatíticas, caracterizadas principalmente, pela alternância de bandas de neossoma e paleossoma, cujas espessuras variam de decamétrica, quando há predominância do neossoma, a centimétrica, quando há predominância de paleossoma (AHRENDT, 2005).

O paleossoma tem natureza gnáissica, sendo constituído principalmente por feldspato, quartzo e biotita, a foliação é dada pelos minerais máficos, concordante com o bandamento. O neossoma tem origem granítica, sendo constituído por quartzo e feldspato, principalmente. Os minerais secundários mais comuns são óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro e os argilominerais. O trabalho do IPT (1978) afirma que as bandas são dobradas, transpostas e redobradas, sendo que todo este conjunto é cortado por veios, lentes e bolsões róseos de natureza quartzo-feldspática de texturas granítica e pegmatítica. Segundo Ahrendt (2005) o bandamento apresenta atitude média N76E/55NW, a foliação N70E/75NW e algumas fraturas N30W/85NE.

#### **4.1.3 Relevo**

Segundo Modenesi (1980 e 1983) a região de Campos do Jordão encontra-se inserida no chamado Planalto de Campos do Jordão, compreendendo o trecho da Mantiqueira entre os rios Sapucaí-Mirim e das Bicas, limitado a sudeste pela escarpa da serra e a nordeste pelo alinhamento das serras de Água Limpa, de Pouso Frio e da Coimbra.

Em relação especificamente sobre a área de estudo, o relevo é bastante íngreme, com vales, anfiteatro e escarpas acidentadas. Apresenta amplitude de aproximadamente 100 metros, com altitude variando entre 1598m a 1700m.

As declividades das encostas são em sua maioria superiores a 25°, possuindo áreas com declividade de 65°, conforme apresentado adiante no mapa de declividade. Na Figura 54 é apresentada a área de estudo inserida no contexto regional de relevo. Nela observa-se que as feições de relevo da área são comuns a outras áreas.

#### **4.1.4 Aspectos climáticos**

Campos do Jordão possui temperatura média anual de 13°C apresentando temperaturas máximas de até 30°C nos meses de verão e mínimas de 3,2°C negativos nos meses de inverno. Em relação à pluviosidade, a cidade apresenta valores totais anuais variando entre 1.200 a 2.000 mm.

#### **4.2 Documentos Cartográficos Básicos**

Os documentos cartográficos básicos constituem a base de dados e são oriundos do trabalho de Ahrendt (2005). Os mapas básicos são fundamentais, pois a partir deles as primeiras análises são realizadas e também são a base para a elaboração de mapas específicos. A escala de trabalho utilizada na pesquisa é de 1:500 e todos os mapas foram divididos em grids regulares de 10x10 m.

##### **4.2.1 Mapa topográfico**

No trabalho de Ahrendt (2005) o mapa topográfico foi gerado a partir da compilação de mapas topográficos já existentes e a escala de trabalho que foi utilizada é de 1:2000. Neste trabalho a escala trabalhada é de 1:500.

O mapa topográfico do estudo serviu de base para a elaboração de duas cartas seguintes, carta de declividade e de direção de vertentes, que serão apresentados nos próximos tópicos.

#### **4.2.2 Carta de declividade**

O mapa topográfico, em escala 1:500, possui as curvas de nível eqüidistantes de um em um metro e a partir deste, que foi dividido em grids regulares, gerou-se a carta de declividade manualmente para cada grid e o valor é apresentado em graus (°). Na Figura 55 é apresentada a carta de declividade onde podem ser observados os valores de declividade dos grids das áreas estudadas.

#### **4.2.3 Carta de direção das vertentes**

A carta de direção das vertentes (Figura 56) representa a direção potencial preferencial de fluxo de massa de materiais geológicos. Os valores também são apresentados em graus (°).

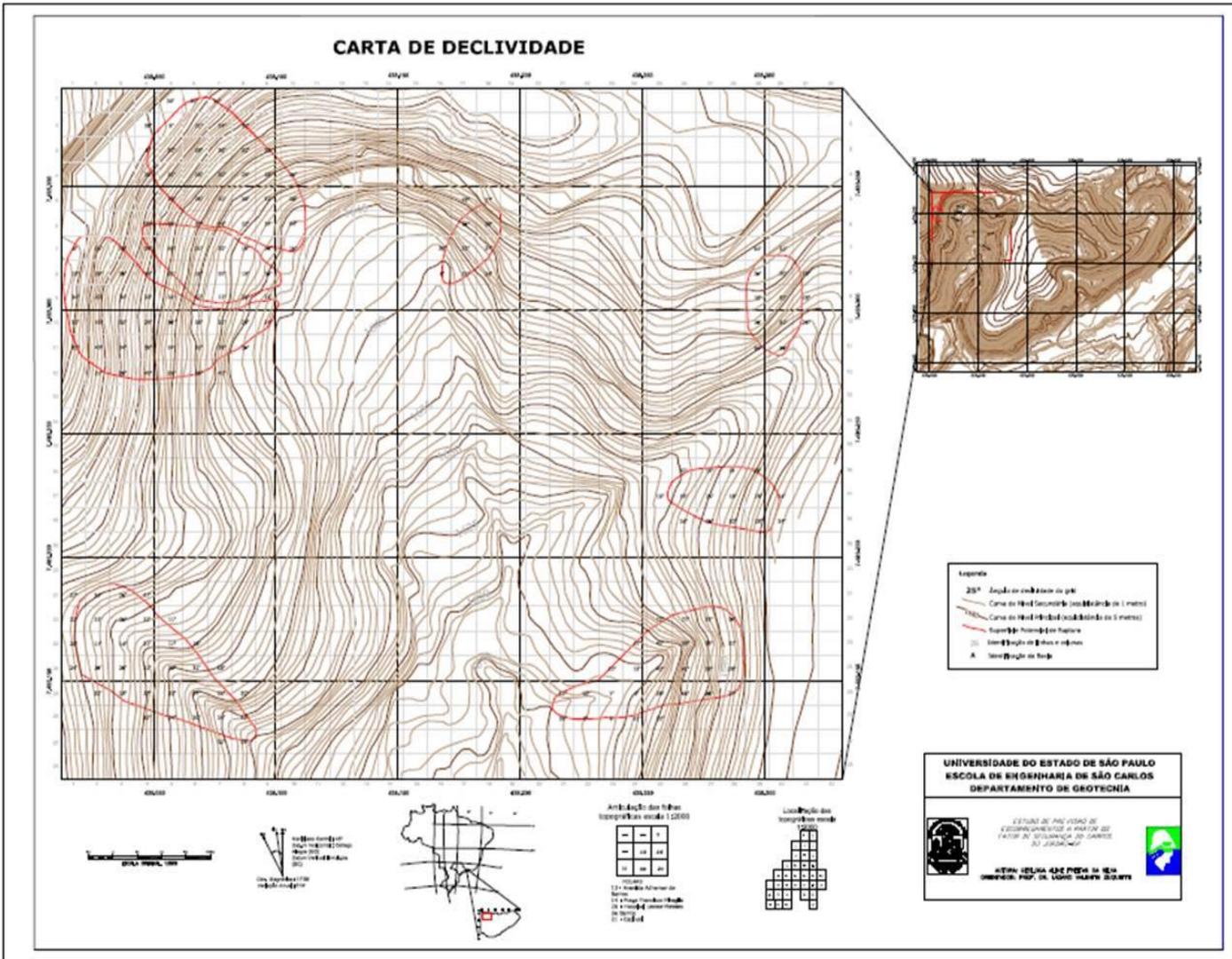


Figura 55 – Carta de declividade.



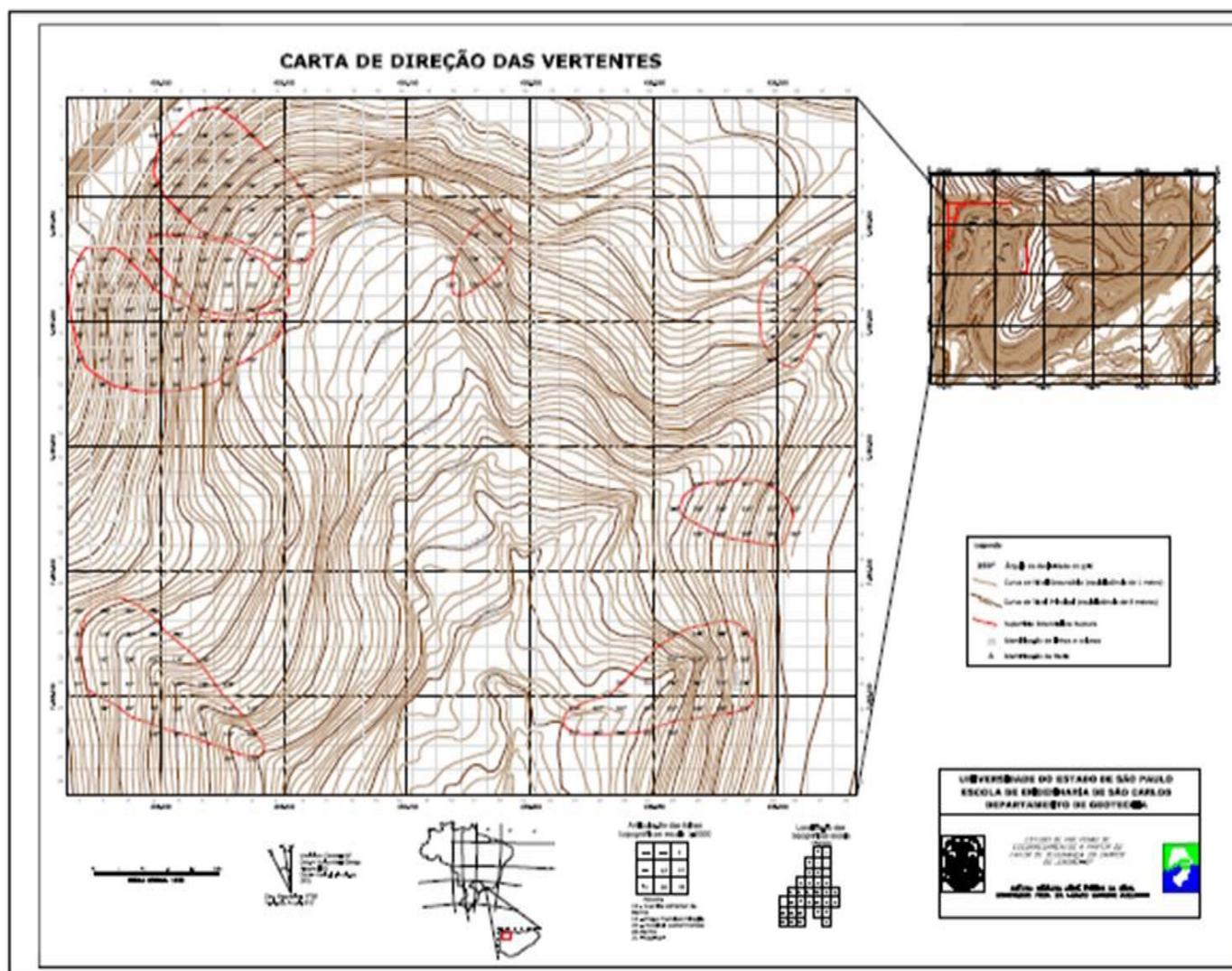


Figura 56 – Carta de direção das vertentes.



### **4.3 Materiais Inconsolidados**

Para a execução da metodologia proposta, a identificação e descrição dos materiais inconsolidados, assim como, dos perfis típicos encontrados na área constituem etapa fundamental no trabalho.

Na área de estudo foram identificados por Ahrendt (2005) oito diferentes tipos de materiais inconsolidados diferenciados de acordo com a sua origem e composição, sendo que cada tipo apresenta características particulares, as quais serão descritas a seguir. E, de acordo com a ocorrência e a disposição desses materiais inconsolidados, estes formam doze unidades de materiais inconsolidados (perfis típicos), que serão descritos mais a seguir.

Quanto à composição, os materiais inconsolidados encontrados são bastante semelhantes por toda a área, apresentando apenas variações texturais decorrentes da própria heterogeneidade do substrato rochoso migmatítico.

Existe uma tendência em relação à disposição dos materiais em relação à cor, sendo uma característica marcante na área. Geralmente ocorrem materiais de tons amarelo amarronzados sobre materiais de cor avermelhada.

As descrições que serão apresentadas a seguir foram obtidas de Ahrendt (2005).

#### **4.3.1 Descrição sucinta dos tipos de materiais inconsolidados**

Os materiais possuem três origens distintas: residual, aterro e aluvionar. Esta classificação é baseada essencialmente em características texturais, de grau de alteração e de origem dos materiais inconsolidados.

#### 4.3.1.1 Materiais inconsolidados de origem residual

Os materiais inconsolidados residuais foram classificados em residuais de alteração (I-R e II-R) e saprólitos (III-S, IV-S e V-S).

O solo residual I-R é um material composto predominantemente por silte e areia fina, com pouca ocorrência de argila. Pode conter grânulos e/ou nódulos tubuliformes, de composição não definida. Pode ocorrer em cores que variam de marrom a amarela mostarda. Este tipo de material inconsolidado apresenta porosidades, em geral, bastante elevadas, sendo bastante comum valores entre 50 e 55%.

O solo residual II-R possui textura mais argilosa em relação ao material anterior, no entanto, as quantidades de silte e areia são ainda predominantes. Ocorre, em geral, nas cores vermelha clara a escura, porém quando em transição para o saprólito pode apresentar coloração levemente roxa. Pode-se considerar que, em geral, sua composição é homogênea, porém localmente próximo à superfície da camada podem ocorrer concentrações pouco espessas (< 5 cm) de óxido de manganês e/ou ferro. O contato entre os dois materiais residuais, I-R e II-R, ocorre comumente de maneira gradacional apresentando uma faixa estreita de transição. Quanto à porosidade do material ela varia bastante, mas em geral são valores menores que o material do tipo I-R, em média de 50%.

O material saprolítico III-S é resultante da decomposição da porção gnáissica da rocha parental, possuindo textura predominantemente de areia argilosa. Para este tipo de saprólito os valores de porosidade variam entre 45 e 53 % e possui cor

predominantemente vermelha, podendo ocorrer pequenas faixas esbranquiçadas (caulinitizadas) ou amareladas.

O material saprolítico IV-S é o resultado da decomposição da porção mais granítica do migmatito, havendo predominância de areia fina e silte e ausência de argila. Quanto à porosidade, os valores encontrados são mais elevados do que o saprolito do tipo III-S, variando de 50 até 60% e, assim como o material III-S, este material mantém as estruturas da rocha mãe. O grau de alteração deste material é mais lento que no saprolito do tipo III-S devido à predominância de minerais mais resistentes ao intemperismo. Por consequência, seus perfis são pouco profundos e são encontrados formando taludes de grande extensão e alta declividade.

O último material saprolítico (V-S) é caracterizado pela intercalação métrica a decimétrica dos materiais saprolíticos anteriores (III-S e IV-S). Devido a isso, ocorre alteração diferencial gerando intercalação de faixas mais alteradas de textura argilosa, e menos alteradas de textura silte arenosa.

#### 4.3.1.2 Materiais inconsolidados de aterro

Devido a área ser densamente ocupada a existência de aterros é bastante comum, com texturas variadas e podem ser compostos por diversos materiais de origem antrópica, além de serem mal compactados, com espessuras no máximo de um metro.

Foram definidos dois tipos principais de materiais inconsolidados de aterro, denominados de VI-A e VII-A, descritos a seguir.

O primeiro material de aterro (VI-A) é um material inconsolidado heterogêneo, cuja textura é basicamente silto-arenosa podendo conter pequena quantidade de argila. A heterogeneidade é dada pela presença de seixos centimétricos e

fragmentos de rocha dispersos em meio à matriz silto-arenosa. Este material possui cor predominantemente marrom ou um pouco arroxeadada com variações na tonalidade, encontrado geralmente no topo dos perfis sendo o contato deste com o material da camada inferior é, em geral, abrupto.

O material de aterro (VII-A) possui como principal característica a heterogeneidade textural, sendo composto por materiais de diversas origens. Contém predominância de silte e areia, além de grande conteúdo em seixos, pedaços de rochas e detritos como plásticos, vidros, madeira, entre outros. Assim como o outro material de aterro este apresenta-se em geral pouco compactado.

#### 4.3.1.3 Materiais inconsolidados de origem aluvionar

Na área é encontrado apenas um tipo de material inconsolidado de origem aluvionar (VIII-T), encontrado nas regiões junto às principais drenagens.

É um material com composição predominantemente arenosa, porém com considerável presença de argila, coloração escura e alta plasticidade, devido à alta presença de matéria orgânica. Pode apresentar seixos centimétricos predominantemente arredondados que se encontram distribuídos aleatoriamente ou concentrados em camadas.

#### **4.3.2 Unidades de Materiais Inconsolidados**

A partir da disposição estratigráfica dos materiais inconsolidados descritos previamente, estabeleceu-se perfis típicos que podem ser encontrados na área. Ao total foram definidos 12 perfis que são chamados de Unidade de Materiais Inconsolidados.

#### 4.3.2.1 Unidade U1

Esta Unidade pode apresentar uma profundidade total de materiais inconsolidados superior a 3m, sendo o contato com o topo do saprólito dificilmente encontrado. A seqüência de camadas que melhor representa esta Unidade é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Características gerais do perfil da Unidade U1 (adaptado de AHRENDT, 2005).

<b>Tipos de M.I</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Gradação granulométrica</b>	<b>Contato</b>
VI-A	0,5-1	1	Abrupto
I-R	0,3-0,7	2	Gradual
II-R	1-2,5	1	----

Obs. Presença de veios de quartzo em meio a camada I-R

---

1 Decrescente para a base

2 Crescente para a base

O que diferencia esta Unidade sendo sua principal característica é a presença constante do material de aterro (VI-A) na superfície, com profundidades em torno de 0,5 a 1m. Na Figura 57 há uma foto do perfil.

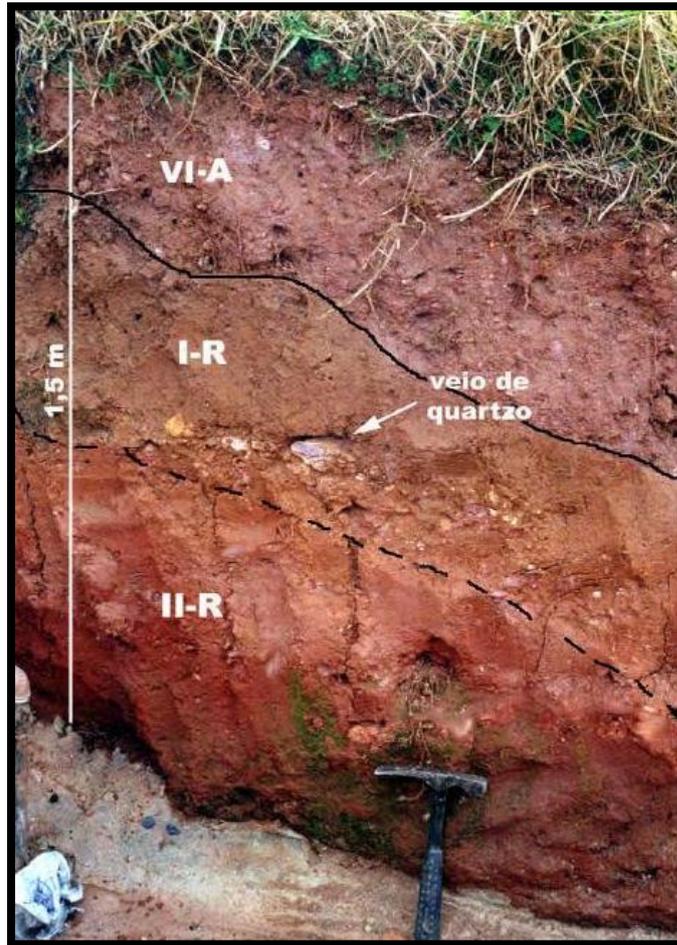


Figura 57 - Exemplo de perfil típico da Unidade U1 (AHRENDT, 2005).

#### 4.3.2.2 Unidade U2

Esta Unidade se diferencia da U1 visto que a profundidade total não ultrapassa 3m e o material de aterro VI-A é encontrado apenas localmente. A porção superficial é caracterizada pela presença do material residual I-R, cuja profundidade pode chegar a 1m. A Tabela 8 apresenta as características dessa Unidade e a Figura 58 uma foto da seção.

Tabela 8 - Características gerais do perfil da Unidade U2 (adaptado de AHRENDT, 2005).

Tipos de M.I	Espessura (m)	Gradação granulométrica	Contato
I-R	0,5-1	1	Gradual
II-R	1-2	2	Gradual
III-S	> 1	1	----

Obs. Presença de raízes e matéria orgânica no topo da camada I-R.  
 Veios de quartzo dispersos nas camadas I-R e II-R.  
 Localmente podem ocorrer camadas superficiais do tipo VI-A.

1 Decrescente para a base  
 2 Crescente para a base

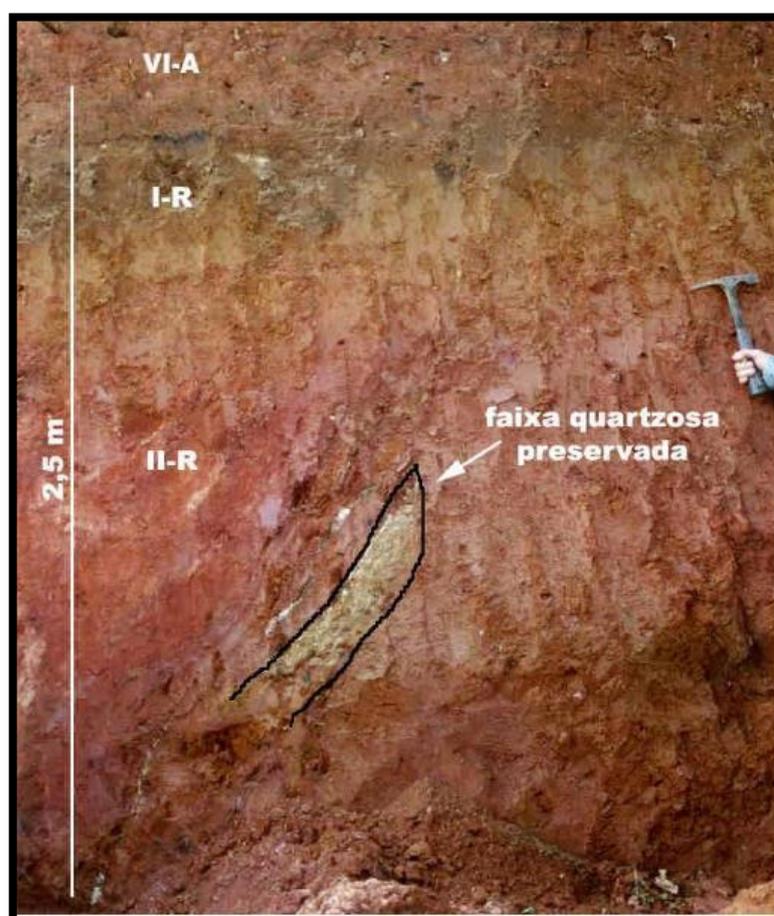


Figura 58 - Exemplo de perfil típico da Unidade U2 (AHRENDT, 2005).

#### 4.3.2.3 Unidade U3

Esta unidade possui características semelhantes à Unidade U1. Apresenta uma camada espessa de aterro do tipo IV-A sobreposto ao perfil residual padrão. Considerando a espessura de todo o perfil ela pode chegar a 3m, sendo que a camada de material residual I-R possui profundidade máxima de 0,5m (Tabela 9).

Tabela 9 - Características gerais do perfil da Unidade U3 (adaptado de AHRENDT, 2005).

<b>Tipos de M. I.</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Gradação granulométrica</b>	<b>Contato</b>
VI-A	0,5-1,5	3	Abrupto
I-R	0,2-0,5	1	Gradual
II-R	1-1,5	3	Gradual
III-S	> 1	3	----
Obs.	Presença de fragmentos de rocha na base da camada II-R		

*1 Decrescente para a base*

*3 Inexistente*

O que diferencia esta Unidade da Unidade U1 é que nesta é possível observar o contato com material saprolítico do tipo III-S. Além disso, é comum a presença de fragmentos de rocha na base do material residual II-R.

#### 4.3.2.4 Unidade U4

Esta Unidade apresenta profundidade máxima de 2m, sendo que a proporção dos materiais residuais I-R e II-R são equivalentes. A profundidade da camada II-R varia lateralmente, de acordo com o tipo de saprólito, podendo chegar até 2m em locais onde há predominância da porção gnáissica do bandamento migmatítico.

Esta Unidade é bastante comum na área, sendo que localmente pode ocorrer material de aterro do tipo VI-A apresentando profundidade inferior a 0,3m. E também, em alguns locais é possível visualizar parte do saprólito, sendo que a espessura da porção aflorante não ultrapassa 1m. A Tabela 10 apresenta as principais características desta Unidade.

Tabela 10 - Características gerais do perfil da Unidade U4 (adaptado de AHRENDT, 2005).

<b>Tipos de M. I.</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Gradação granulométrica</b>	<b>Contato</b>
I-R	0,5-1	1	Abrupto
II-R	0,5-1	2 ou 3*	Abrupto
V-S	> 1		

Obs. \* 3 quando em contato com III-S e 2 quando em contato com IV-S

---

1 *Decrescente para a base*  
 2 *Crescente para a base*  
 3 *Inexistente*

#### 4.3.2.5 Unidade U5

Esta Unidade possui profundidade máxima de 1,5 m e apresenta a mesma seqüência de materiais da Unidade U4, sendo que a camada do material II-R possui espessura inferior (Tabela 11).

Tabela 11 - Características gerais do perfil da Unidade U5 (adaptado de AHRENDT, 2005).

<b>Tipos de M. I.</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Gradação granulométrica</b>	<b>Contato</b>
I-R	0,7-1	1	Abrupto
II-R	0,2-0,5	1 ou 2	Gradual
IV-S	> 1,5		

Obs. Horizonte rico em matéria orgânica e presença de raízes no topo do perfil.  
 Presença de fragmentos de rocha alterada junto ao contato da camada II-R e IV-S.

---

*1 Decrescente para a base*  
*2 Crescente para a base*

Esta Unidade apresenta porções de coloração escura, aparentemente ricas em matéria orgânica, entre as camadas I-R e II-R.

#### 4.3.2.6 Unidade U5a

A Unidade U5 ainda pode ser subdividida em U5a. Esta se destaca por apresentar predominância do saprólito do tipo IV-S na camada inferior (Figura 59).

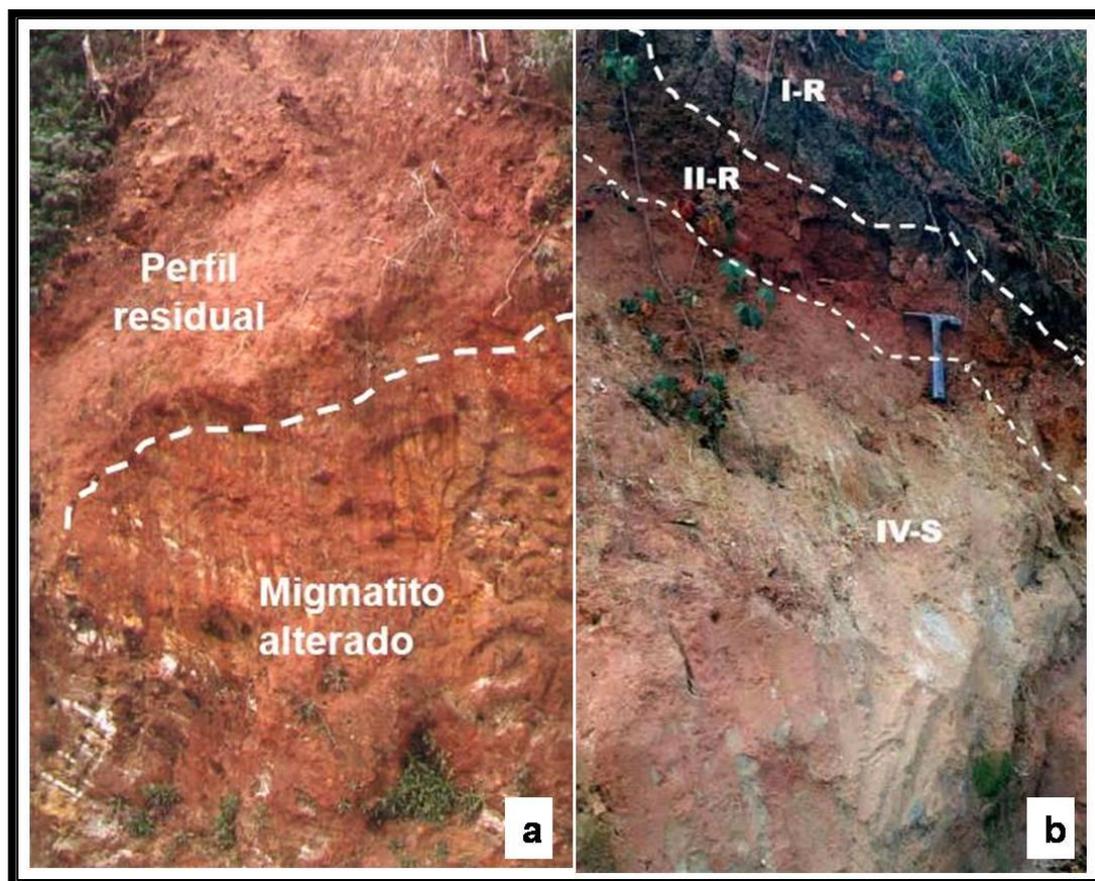


Figura 59 - Perfil representativo das unidades U5 e U5a (AHRENDT, 2005).

#### 4.3.2.7 Unidade U6

Esta Unidade se destaca por apresentar pequena profundidade. Considerando da superfície até o topo do saprólito chega-se a apenas 0,7m. É uma Unidade que é composta por um perfil residual completo, ainda que apresente pequena espessura (Tabela 12).

Tabela 12 - Características gerais do perfil da Unidade U6 (adaptado de AHRENDT, 2005).

<b>Tipos de M. I.</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Gradação granulométrica</b>	<b>Contato</b>
VII-A	0,4	3	Abrupto
I-R	0,2	3	Gradual
II-R	0,1	3	Gradual
III-S/V-S	> 1		----
Obs.	Profundidade de V-S pode ser maior nas faixas mais gnáissicas		

*3 Inexistente*

#### 4.3.2.8 Unidade U6a

Esta Unidade difere da Unidade U6 original devido não apresentar o material residual II-R. Também ocorre enriquecimento em matéria orgânica na camada residual I-R. As espessuras dos demais materiais permanecem iguais a U6.

#### 4.3.2.9 Unidade U7

A principal característica desta Unidade é a ausência do material residual do tipo II-R, havendo transição direta do material I-R para o saprólito V-S (Tabela 13). Localmente podem ser encontradas porções de material de aterro do tipo VI-A, em geral de pequena profundidade. A Figura 60 apresenta um exemplo do perfil desta Unidade.

Tabela 13 - Características gerais do perfil da Unidade U7 (adaptado de AHRENDT, 2005).

<b>Tipos de M. I.</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Gradação granulométrica</b>	<b>Contato</b>
I-R	0,7	1	Gradual
V-S	> 1,5		

*1 Decrescente para a base*

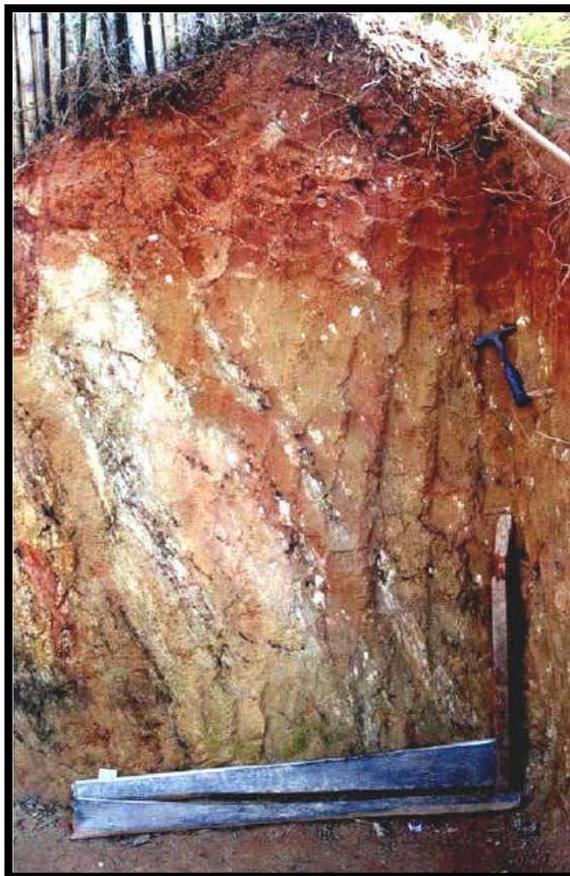


Figura 60 - Exemplo de perfil típico da unidade U7 (AHRENDT, 2005).

#### 4.3.2.10 Unidade 8

Esta Unidade caracteriza-se pela presença de uma espessa camada de material de aterro do tipo VII-A diretamente sobre o saprólito (Tabela 14). Ainda pode ocorrer localmente camadas delgadas de material arenoso do tipo residual I-R em contato gradacional com o saprólito e também afloramentos da rocha migmatítica alterada.

Tabela 14 - Características gerais do perfil da Unidade U8 (adaptado de AHRENDT, 2005).

<b>Tipos de M. I.</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Gradação granulométrica</b>	<b>Contato</b>
VII-A	1-1,2	3	Abrupto
III-S/IV-S	> 1	----	----
Obs.	Localmente, ocorrência de camada delgada de material I-R entre as camadas		

3 Inexistente

#### 4.3.2.11 Unidade 9

Todos os tipos de saprolitos ocorrem nesta Unidade (Tabela 15). Localmente pode se observar também gradação suave do saprólito para a rocha migmatítica alterada na porção inferior do perfil. Em alguns pontos, como as regiões próximas às drenagens, afloramentos da rocha são podem ser encontrados. A Figura 61 apresenta um exemplo do perfil desta Unidade.

Tabela 15 - Características gerais do perfil da Unidade U9 (adaptado de AHRENDT, 2005).

<b>Tipos de M. I.</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Gradação granulométrica</b>	<b>Contato</b>
III-S/IV-S/V-S	> 2	3	Gradual
Rocha alterada	----	----	----
Obs.	Localmente presença de vegetação e material arenoso e rico em raízes na superfície		

3 Inexistente

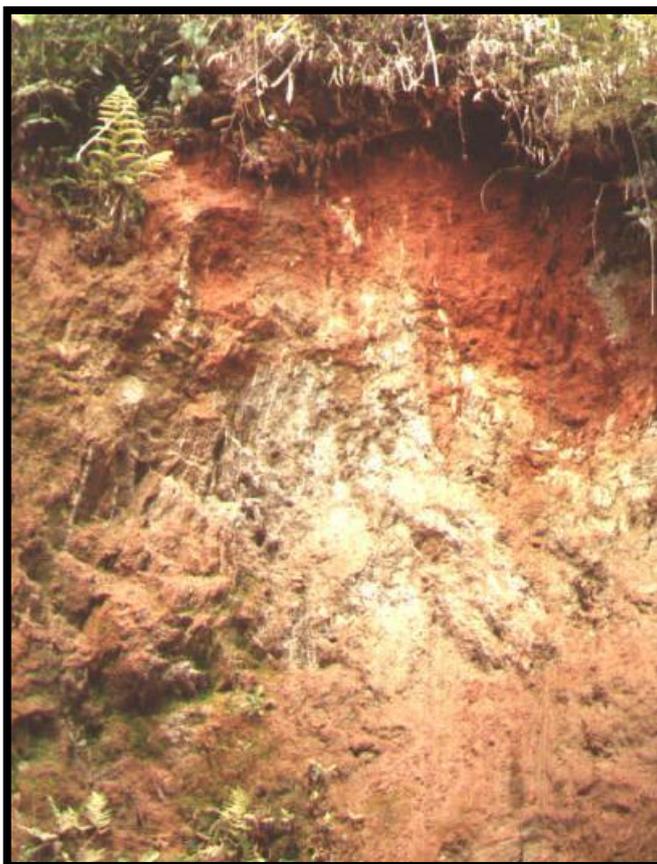


Figura 61 - Exemplo de perfil típico da Unidade U9 (AHRENDT, 2005).

#### 4.3.2.12 Unidade 10

Esta Unidade é comum nas regiões topograficamente mais baixas da área e é caracterizada pela presença do material de origem aluvionar VIII-T sobrejacente à rocha alterada (Tabela 16). Outra característica marcante é que nesta Unidade é bastante comum a presença de afloramentos da rocha migmatítica sã na base do perfil (Figura 62).

Tabela 16 - Características gerais do perfil da Unidade U10 (adaptado de AHRENDT, 2005).

Tipos de M. I.	Espessura (m)	Gradação granulométrica	Contato
VIII-T	1-1,5	3	Abrupto
Rocha alterada	----	----	----

*3 Inexistente*



Figura 62 - Exemplo de perfil típico da Unidade U10 (AHRENDT, 2005).

### 4.3.3 Mapa de Materiais Inconsolidados

A partir da definição das Unidades de materiais inconsolidados foi elaborado um mapa da distribuição destas Unidades na área de estudo (Figura 63).

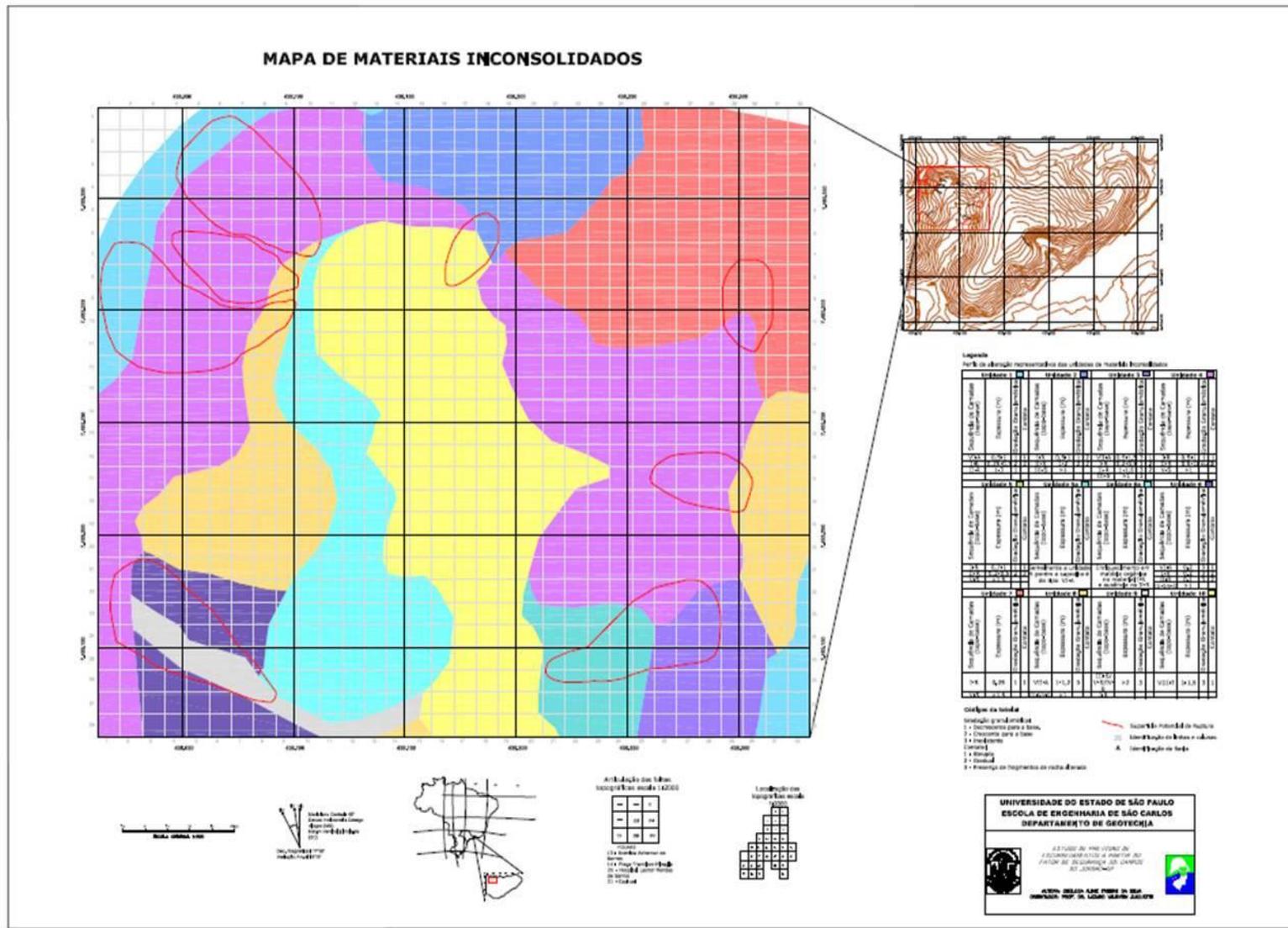


Figura 63 – Mapa de Unidades de materiais inconsolidados.



#### 4.4 Pluviosidade

A análise do histórico dos dados pluviográficos da cidade de Campos do Jordão neste trabalho teve por objetivo definir tipos de eventos de chuva a serem utilizados no modelo de infiltração. No modelo de infiltração, como já foi mencionado, um dos dados de entrada são exatamente a quantidade ( $Q_c$ ) e a duração ( $T$ ) da chuva.

A Figura 64 apresenta um gráfico de máximos e mínimos mensais desde 1937. Com este gráfico fica-se claro que o período chuvoso acontece nos meses de setembro a março, sendo que os mais chuvosos são dezembro e janeiro, e a estação de seca ocorre de abril a agosto, sendo mais significativa nos meses de julho e agosto.

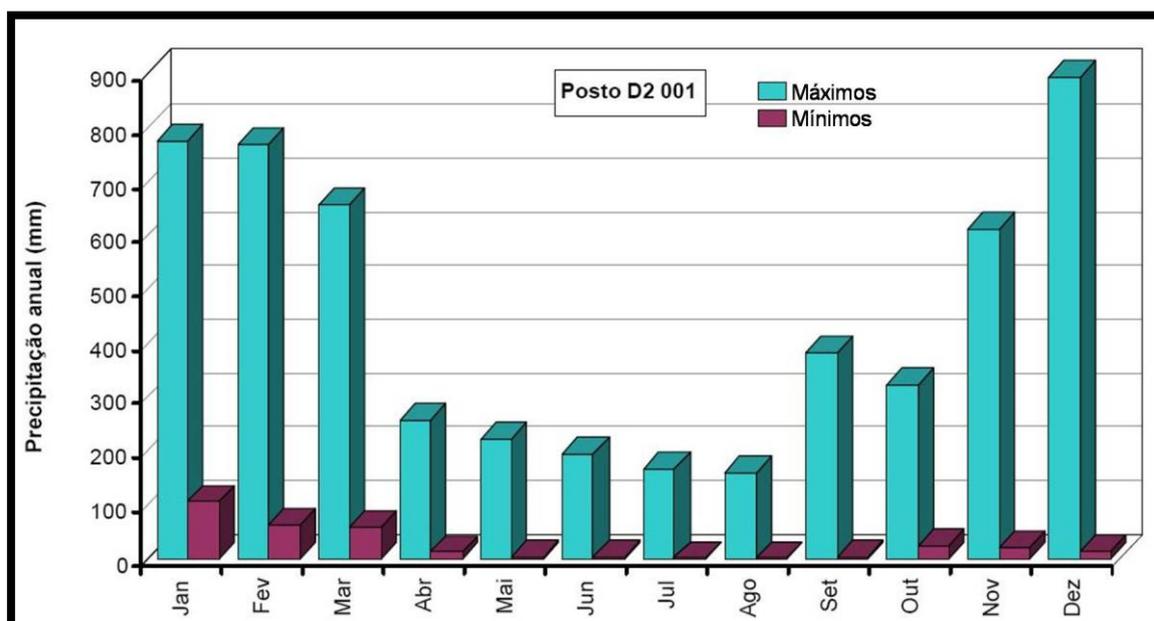


Figura 64 - Valores médios de precipitação (máximos e mínimos) mensais medidos a partir de 1937 (adaptado de AHRENDT, 2005).

Neste trabalho foram selecionados dois eventos chuvosos para serem simulados no programa HYDRUS. O primeiro de longa duração que ocorreu nos dias 13 e 14 de outubro de 1995, com duração de 27 horas com precipitação total de 149,7 mm. O segundo é um evento pluviométrico de grande intensidade com  $Q_c$  de 85 mm e T de 20 minutos que ocorreu em 5 de fevereiro de 2001.

Foram escolhidos dois eventos bem distintos a fim de se conhecer o comportamento dos perfis de solo frente a estas chuvas. Desta forma foi possível obter valores de umidade volumétrica em diferentes profundidades do perfil após cada tipo de evento.

## 5. APLICAÇÃO EM CAMPOS DO JORDÃO

Foram selecionadas oito encostas dentro da área de estudo para a aplicação da metodologia proposta (Figura 65). As Figuras 66, 67 e 68 ilustram algumas áreas de estudo selecionadas.

Os dados de índices físicos, parâmetros de resistência e os parâmetros de Van Genuchten referentes a cada material inconsolidado, assim como o mapa de Unidade de materiais inconsolidados foram compilados do trabalho de AHRENDT (2005). Os dados de coesão e ângulo de atrito totais apresentados foram obtidos através de ensaios de cisalhamento direto tanto na condição de umidade natural quanto na condição saturada realizados por Ahrendt (2005). Todos os dados que foram utilizados na pesquisa encontram-se nas Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19.

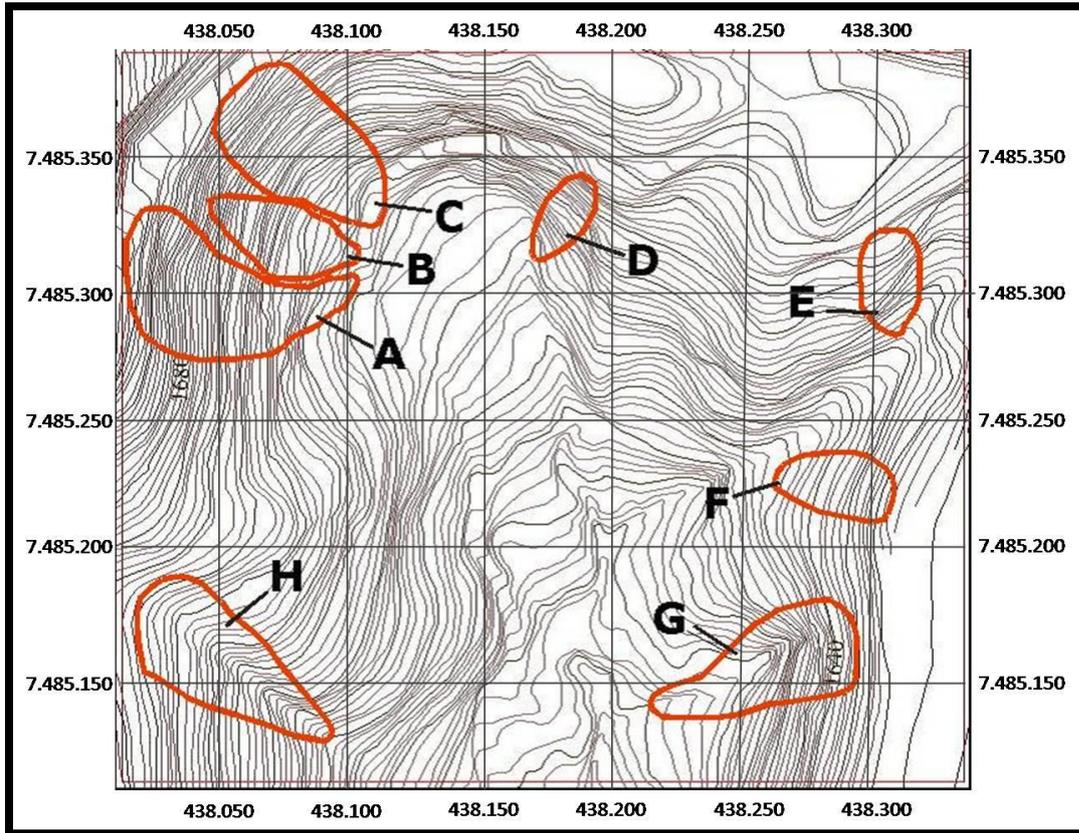


Figura 65 – Localização das oito encostas selecionadas para a aplicação da metodologia proposta.

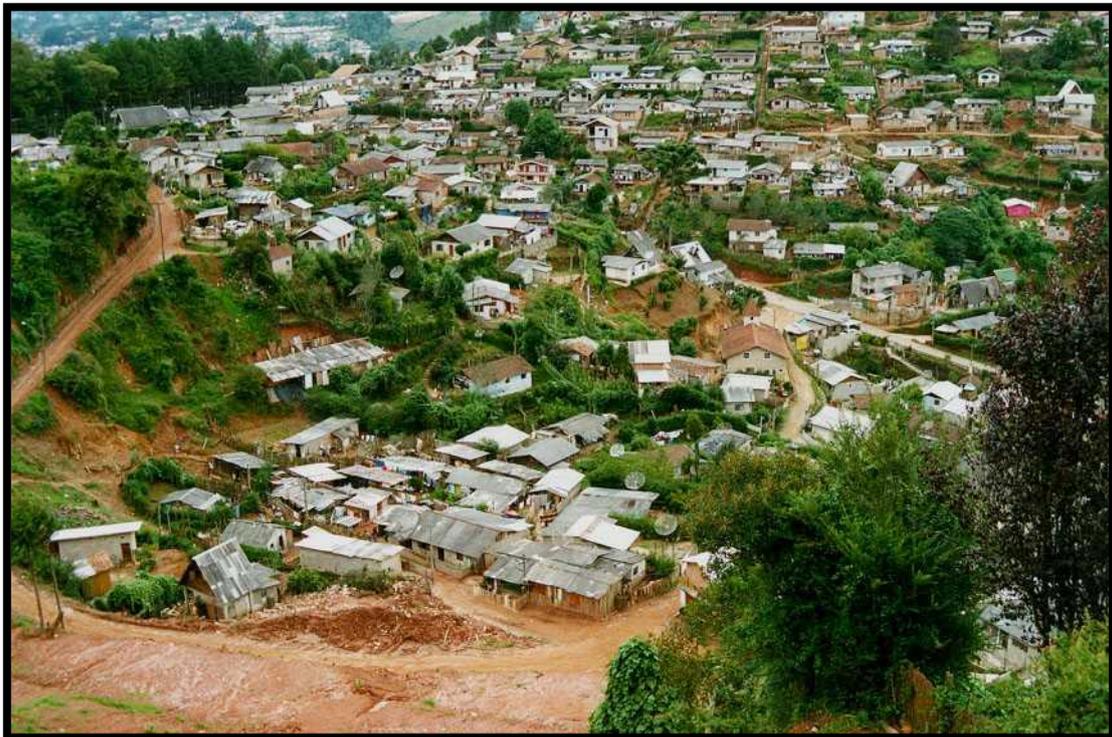


Figura 66 – Visualização da região da área D.



Figura 67 – Visualização da região da área F.



Figura 68 - Visualização da região da área H.

Tabela 17 - Índices físicos dos materiais inconsolidados.

Unidades	Materiais	Espessura (cm)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$n_{Med}$	$\theta_{cc}$
U1	VI-A	50	27,5	11,6	0,55	0,15
	I-R	25	26,71	13,5	0,55	0,15
	II-R	-	27,89	14,3	0,485	0,25
U2	I-R	50	26,71	13,5	0,55	0,15
	II-R	100	27,89	14,3	0,485	0,25
	III-S	-	27,51	12,8	0,49	0,3
U3	VII-A	50	28	11,8	0,54	0,2
	I-R	20	26,71	13,5	0,55	0,15
	II-R	100	27,89	14,3	0,485	0,25
	III-S	-	27,51	12,8	0,49	0,3
U4	I-R	50	26,71	13,5	0,55	0,15
	II-R	50	27,89	14,3	0,485	0,25
	V-S	-	27,7	12,5	0,52	0,1
U5a	I-R	70	26,71	13,5	0,55	0,15
	II-R	20	27,89	14,3	0,485	0,25
	VI-A	-	27,5	11,6	0,55	0,15
U6	VI-A	20	27,5	11,6	0,55	0,15
	I-R	20	26,71	13,5	0,55	0,15
	II-R	10	27,89	14,3	0,485	0,25
	V-S	-	27,7	12,5	0,52	0,1
U6a	VI-A	20	27,5	11,6	0,55	0,15
	I-R	20	26,71	13,5	0,55	0,15
	V-S	-	27,7	12,5	0,52	0,1
U7	I-R	25	26,71	13,5	0,55	0,15
	V-S	-	27,7	12,5	0,52	0,1
U8	VII-A	100	28	11,8	0,54	0,2
	V-S	-	27,7	12,5	0,52	0,1
U9	V-S	200	27,7	12,5	0,52	0,1
U10	VIII-T	100	31,04	11	0,5	0,2

Sendo,  $\gamma_s$  o peso específico dos sólidos (kN/m<sup>3</sup>);  $\gamma_d$  o peso específico aparente seco (kN/m<sup>3</sup>);  $n_{Med}$  a porosidade média;  $\theta_{cc}$  a umidade volumétrica da capacidade de campo do material. A umidade de capacidade de campo foi considerada como sendo a umidade inicial nas simulações.

Tabela 18 - Condutividade hidráulica saturada e parâmetros de resistência dos materiais inconsolidados.

Unidades	Materiais	$K_{sat}$ (cm/min)	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$c_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$\phi_s$ (°)
U1	VI-A	3,26E-01	20	0,4	26	31
	I-R	3,11E-01	10	0,4	26	33
	II-R	2,11E-01	20	0,2	26	30
U2	I-R	5,56E-01	9,8	1,68	28,5	29,5
	II-R	2,11E-01	20	0,2	26	30
	III-S	6,00E-04	30	0,2	30	35
U3	VII-A	1,26E+00	10	0,6	26	31
	I-R	3,11E-01	10	0,4	26	33
	II-R	2,11E-01	20	0,2	26	30
	III-S	6,00E-04	30	0,2	30	35
U4	I-R	4,67E-01	10	0,4	26	33,5
	II-R	5,89E-01	20	0,2	26	30
	V-S	6,00E-05	50	0,2	35	40
U5a	I-R	4,58E-01	10	0,4	26	33
	II-R	5,89E-01	20	0,2	26	30
	VI-A	6,00E-03	20	0,4	26	31
U6	VI-A	9,12E-01	20	0,61	26	31,3
	I-R	3,38E-01	10	0,4	26	33
	II-R	5,89E-01	20	0,2	26	30
	V-S	6,00E-05	50	0,2	35	40
U6a	VI-A	6,00E-02	20	0,61	26	31,3
	I-R	5,56E-01	10	0,4	26	33
	V-S	6,00E-05	50	0,2	35	40
U7	I-R	3,00E-01	10	0,4	26	33
	V-S	6,00E-05	50	0,2	35	40
U8	VII-A	1,26E+00	10	0,6	26	31
	V-S	6,00E-05	50	0,2	35	40
U9	V-S	6,00E-04	50	0,2	35	40
U10	VIII-T	6,00E-02	10	0,4	26	33

Sendo,  $K_{sat}$  a condutividade hidráulica saturada (cm/min);  $c$  a coesão total (kN/m<sup>2</sup>);  $c_s$  a coesão total na condição saturada (kN/m<sup>2</sup>);  $\phi$  o ângulo de atrito (°); e  $\phi_s$  o ângulo de atrito na condição saturada (°).

Tabela 19 - Parâmetros de Van Genuchten de cada material inconsolidado.

Unidades	Materiais	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n$	$l$
U1	VI-A	0,02	0,55	0,138	1,592	0,5
	I-R	0,035	0,55	0,115	1,474	0,5
	II-R	0,109	0,485	0,034	1,168	0,5
U2	I-R	0,035	0,55	0,115	1,474	0,5
	II-R	0,109	0,485	0,034	1,168	0,5
	III-S	0,075	0,49	0,039	1,194	0,5
U3	VII-A	0,0286	0,54	0,13	1,700	0,5
	I-R	0,035	0,55	0,115	1,474	0,5
	II-R	0,109	0,485	0,034	1,168	0,5
	III-S	0,075	0,49	0,039	1,194	0,5
U4	I-R	0,035	0,55	0,115	1,474	0,5
	II-R	0,109	0,485	0,034	1,168	0,5
	V-S	0,02	0,52	0,138	1,592	0,5
U5a	I-R	0,035	0,55	0,115	1,474	0,5
	II-R	0,109	0,485	0,034	1,168	0,5
	VI-A	0,02	0,55	0,138	1,592	0,5
U6	VI-A	0,02	0,55	0,138	1,592	0,5
	I-R	0,035	0,55	0,115	1,474	0,5
	II-R	0,109	0,485	0,034	1,168	0,5
	V-S	0,02	0,52	0,138	1,592	0,5
U6a	VI-A	0,02	0,55	0,138	1,592	0,5
	I-R	0,035	0,55	0,115	1,474	0,5
	V-S	0,02	0,52	0,138	1,592	0,5
U7	I-R	0,035	0,55	0,115	1,474	0,5
	V-S	0,02	0,52	0,138	1,592	0,5
U8	VII-A	0,0286	0,54	0,13	1,700	0,5
	V-S	0,02	0,52	0,138	1,592	0,5
U9	V-S	0,02	0,52	0,138	1,592	0,5
U10	VIII-T	0,078	0,50	0,036	1,500	0,5

Sendo,  $\theta_r$  a umidade volumétrica residual;  $\theta_s$  a umidade volumétrica saturada;

$\alpha$  o valor inverso da entrada de ar (cm<sup>-1</sup>),  $n$  um parâmetro de forma; e  $l$  o parâmetro

de conectividade entre os poros.

## **5.1 Dados Pluviográficos**

Conforme foi discutido no capítulo anterior, a base de dados pluviográficos possui registros de até 5 min de intervalo. E para este trabalho foram selecionados dois eventos de chuva de comportamentos bastante distintos. Foi selecionado um evento de longa duração e de pequena intensidade e outro de curta duração, porém com intensidade elevada.

### **5.1.1 Evento de 5 de fevereiro de 2001**

Nesta data tem-se o registro de uma chuva de 85 mm em 20 minutos, constituindo um evento de alta intensidade. Foram analisados todos os eventos de chuva com duração entre 15 e 25 minutos como objetivo de se encontrar um ou mais eventos com características semelhantes, porém todos os eventos existentes possuem intensidade muito inferior ao evento analisado, não podendo ser considerados no cálculo da probabilidade. Desta forma, o evento de 5 de fevereiro de 2001 é único em toda a série histórica analisada.

Através da distribuição de Poisson, previamente apresentada no capítulo de Metodologia, calculou-se a probabilidade de ocorrência de um evento semelhante para os próximos 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25 e 50 anos, como é apresentado no gráfico da Figura 69.

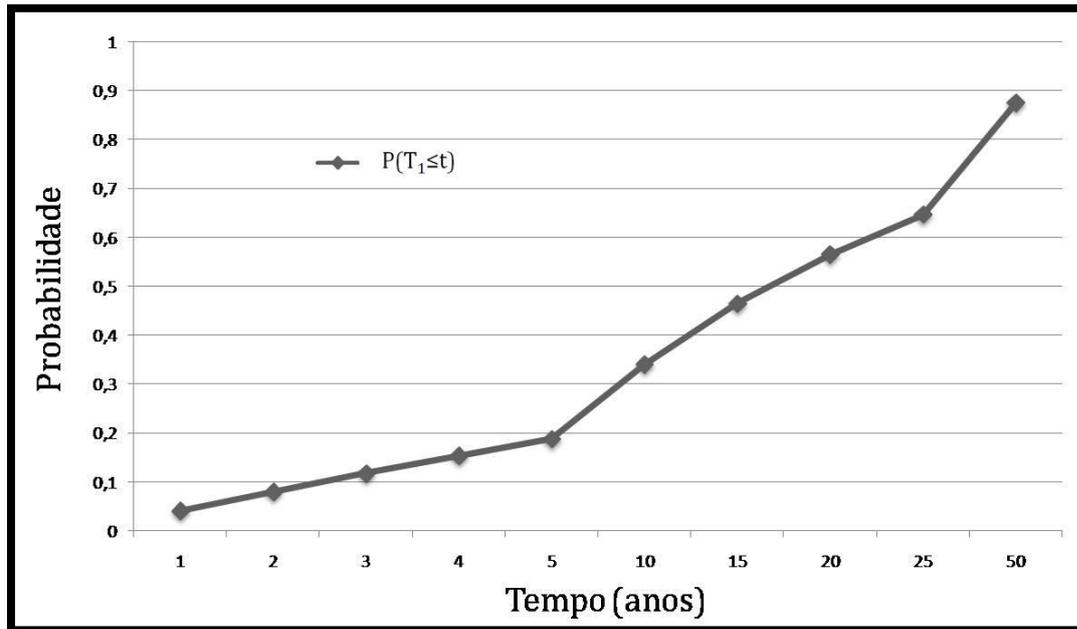


Figura 69 – Probabilidade de ocorrência de um evento semelhante ao de 5 de fevereiro de 2001 ao longo dos anos.

### 5.1.2 Evento de 13-14 de outubro de 1995

O segundo evento escolhido é de pequena intensidade, ocorrido nos dias 13 e 14 de outubro de 1995, chovendo 27 horas ininterruptas com precipitação de 149,7 mm. A Tabela 20 apresenta os valores de chuva em mm, discriminados ao longo do tempo considerado.

Tabela 20 - Valores de precipitação (mm) do evento de 13-14 de outubro de 1995.

<b>Evento de 13-14 de outubro de 1995</b>													
Dia	Hora	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
13	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	0,4
13	14	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,9
13	15	1,2	1,2	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0,9	0,9	0,9
13	16	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
13	17	1,1	1,4	1,4	0,9	0,6	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2
13	18	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
13	19	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
13	20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
13	21	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5
13	22	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,1	0,1
13	23	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,5	1,9	1,9	1,9	2,0	2,1
14	00	1,8	1,1	1,1	1,1	1,1	3,1	3,6	3,5	1,9	1,9	1,4	0,8
14	01	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
14	02	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
14	03	0,4	0,9	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
14	04	0,1	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
14	05	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2
14	06	0,2	0,2	0,2	0,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,4
14	07	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
14	08	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,3
14	09	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
14	10	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,4	0,4
14	11	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,3	0,3	0,3
14	12	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
14	13	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
14	14	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
14	15	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
14	16	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	-	-

Eventos desta magnitude são mais comuns que o evento anterior. Considerando todas as chuvas com duração maior que 15 horas, em toda a série histórica analisada (1975-1997), foram encontrados oito registros. Assim como para o evento de 2001, foi calculada a probabilidade de ocorrência de um evento de intensidade semelhante a este para os próximos anos (Figura 70).

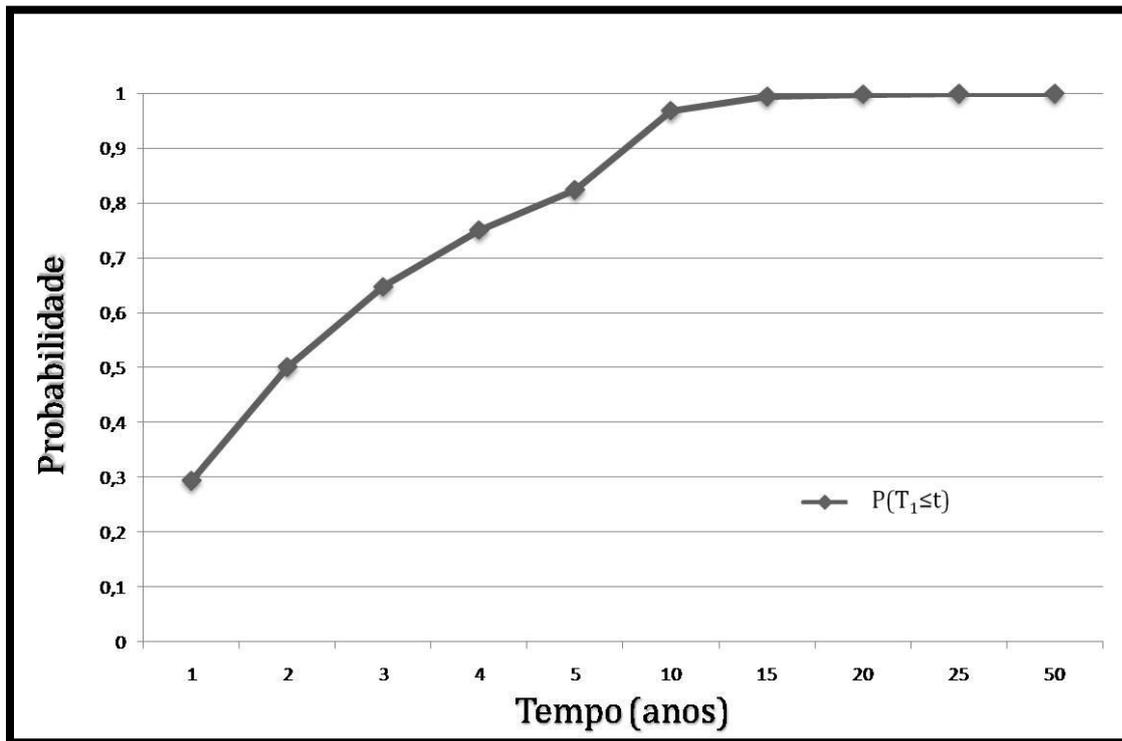


Figura 70 - Probabilidade de ocorrência de um evento semelhante ao de 13-14 de outubro de 1995 ao longo dos anos.

## 5.2 HYDRUS-1D

Para ambos os eventos de chuva e para cada Unidade de material inconsolidado realizou-se a simulação no modelo de infiltração HYDRUS-1D para a profundidade de até 5m. Diversos resultados foram obtidos nesta fase e devido ao grande número de gráficos gerados serão apresentados a seguir exemplos de cada

um, porém todos os resultados obtidos nesta fase encontram-se nos apêndices ao final deste trabalho.

### 5.2.1 Umidade volumétrica x Profundidade (cm)

As Figura 71 e Figura 72 apresentam o perfil de profundidade x umidade volumétrica da Unidade 6a para o evento de 5 de fevereiro de 2001 e para o evento dos dias 13 e 14 de outubro de 1995, respectivamente. Nestes gráficos cada curva ilustra um tempo t em relação ao evento.

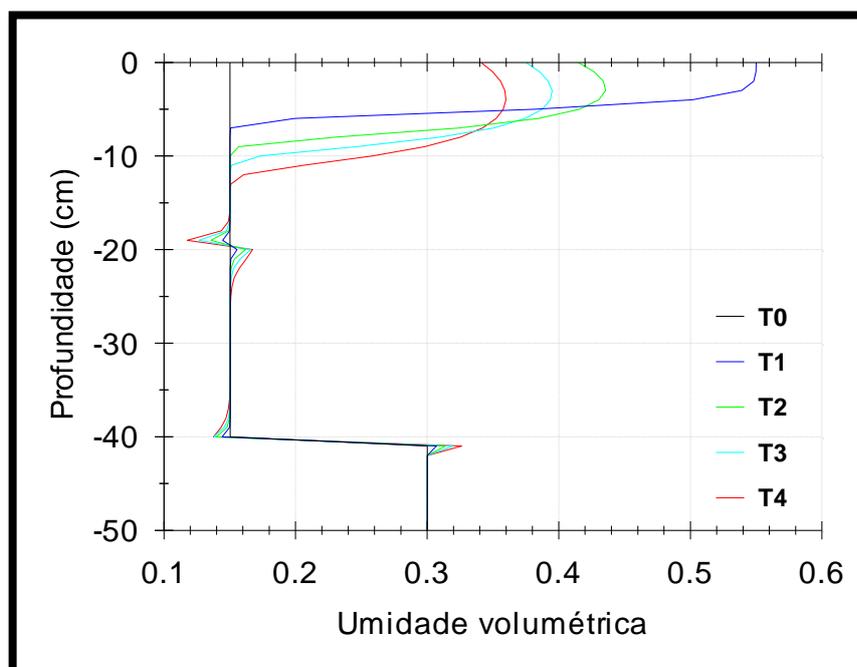


Figura 71 - Umidade volumétrica x Profundidade (cm). Unidade 6a - evento de 5 de fevereiro de 2001.

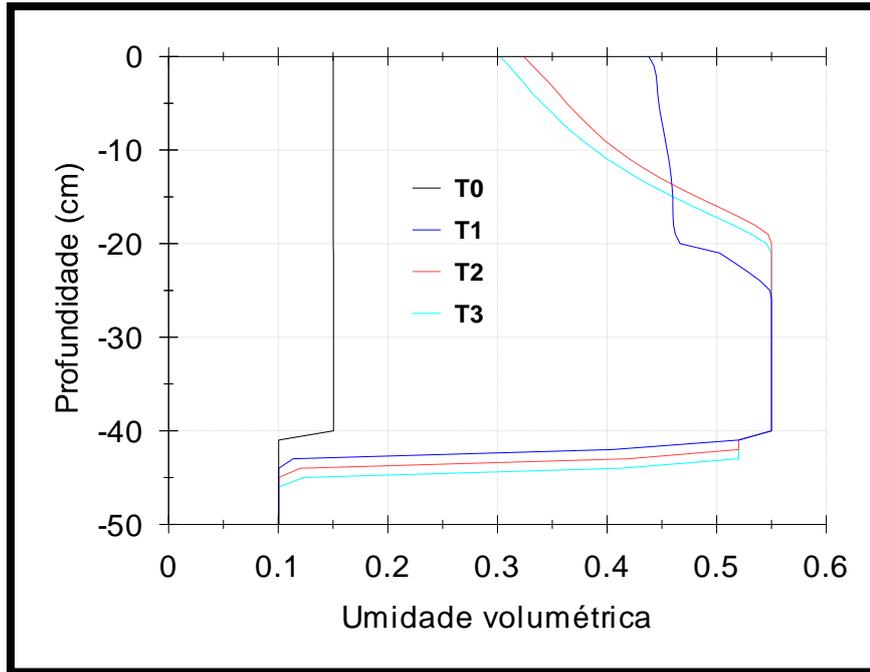


Figura 72 - Umidade volumétrica x Profundidade (cm). Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

Na Figura 71 a curva T0 apresenta o comportamento do perfil de materiais inconsolidados antes do início do evento chuvoso, as curvas T1, T2, T3 e T4 apresentam o comportamento da umidade volumétrica do solo de acordo com a profundidade nos tempos de 20, 60, 120 e 240 minutos após o início da chuva. Ou seja, a curva T1 constitui a resposta do perfil de materiais inconsolidados imediatamente após o término do evento chuvoso e as demais curvas apresentam a resposta considerando um tempo sem precipitação depois do fim da chuva.

Apesar das diferenças geotécnicas entre uma Unidade e outra é possível perceber que frente a este cenário de simulação a resposta dos perfis de materiais inconsolidados, de forma genérica, é bastante similar. Observa-se que em todos os casos na curva T1, ou seja, no momento imediatamente após o término da chuva ( $t = 20$  min), os perfis encontram-se saturados na superfície e permanecem nesta condição por uma pequena profundidade (não ultrapassando 20 cm). Porém este comportamento se modifica a medida que o perfil vai se aprofundando até retornar a

condição de umidade inicial. Para as demais curvas ( $t = 40, 60, 120$  e  $240$  min) devido não haver mais precipitação há uma desaturação na superfície, mas a medida que o perfil de materiais inconsolidados se aprofunda mais úmido encontra-se o solo até um determinado momento em que a umidade volta a condição inicial.

O segundo evento de chuva apresentado possui a quantidade de chuva bem distribuída ao longo do tempo, constituindo uma chuva de baixa intensidade. Devido a estas características o perfil de solo apresenta comportamento bastante distinto em comparação ao evento anterior.

Na Figura 72 a curva T0 apresenta o comportamento do perfil de solo antes do início do evento chuvoso, e as curvas T1, T2 e T3 apresentam o comportamento da umidade volumétrica do solo de acordo com a profundidade nos tempos de 27, 36 e 48 horas após o início da chuva. Assim como no primeiro caso, a curva T1 ilustra a resposta do perfil de solo imediatamente após o término do evento chuvoso e as demais curvas apresentam a resposta do perfil de solo considerando um tempo sem precipitação depois do fim da chuva.

Para este evento a resposta dos perfis de solo na simulação podem ser um pouco distintas. Na maioria das unidades o que ocorre é que mesmo após o evento chuvoso (T1) a superfície do solo não chegou à condição saturada. Porém a umidade aumenta a medida que o perfil se aprofunda. Em algumas Unidades em uma porção mais profunda do perfil o material encontra-se saturado (6, 6a, 7 e 8). Apenas nas Unidades 7 e 9 é que após o evento chuvoso a superfície do perfil está saturada.

Uma característica importante nestes resultados para a chuva de longa duração e pequena intensidade é que para todas as Unidades nas profundidades onde ocorre contato de diferentes materiais inconsolidados a umidade possui valor

relativamente elevado. Isto é importante para o cálculo do fator de segurança tridimensional, pois os potenciais planos de ruptura considerados ocorrem nas interfaces entre diferentes materiais.

### 5.2.2 Infiltração (cm/min) x Tempo (min) e Infiltração acumulada (cm) x Tempo (min)

No gráfico de infiltração é apresentada a taxa de infiltração na superfície por tempo. Por convenção do programa os valores de infiltração são apresentados em valores negativos. A Figura 73 apresenta o gráfico da Unidade 6a para o evento de 1995.

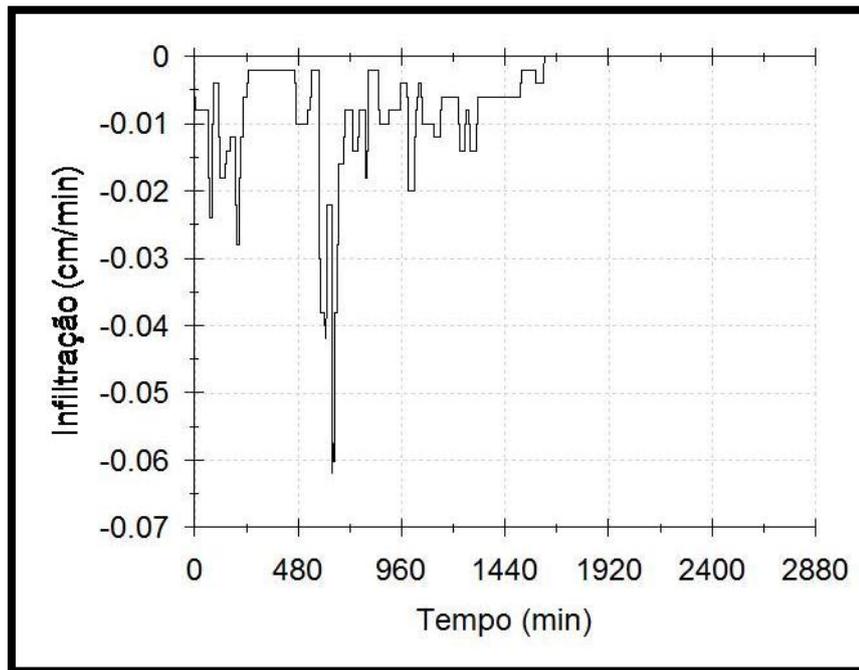


Figura 73 - Infiltração (cm/min) x Tempo (min). Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

Nos casos em que o resultado é constante (Unidades 2, 3, 6 e 8 no evento de 5 de fevereiro de 2001) sabe-se portanto, que toda a água precipitada infiltrou no

perfil, visto que o fluxo não diminuiu em nenhum momento. A Figura 74 apresenta um exemplo deste comportamento, no caso para a Unidade 3.

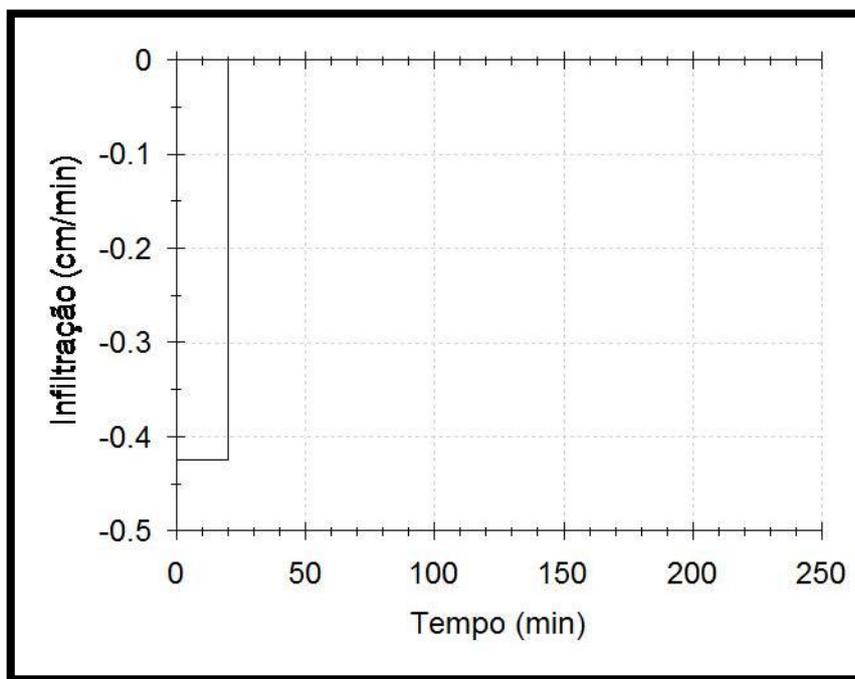


Figura 74 - Infiltração (cm/min) x Tempo (min). Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

Nas figuras seguintes, Figura 75 e Figura 76, são apresentados os gráficos de infiltração acumulada onde é possível observar o valor acumulado de água infiltrada com o tempo.

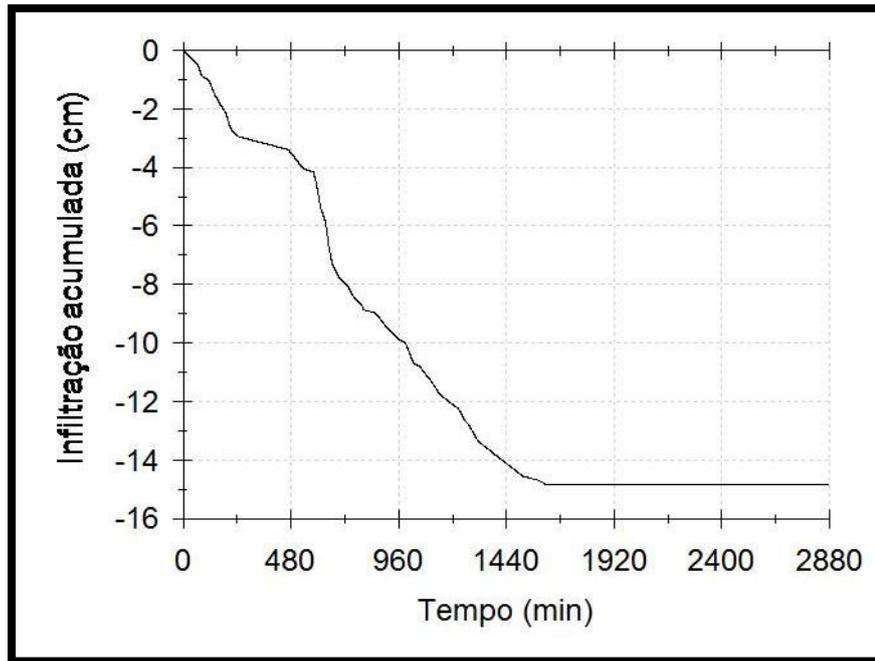


Figura 75 – Infiltração acumulada (cm) x Tempo (min). Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

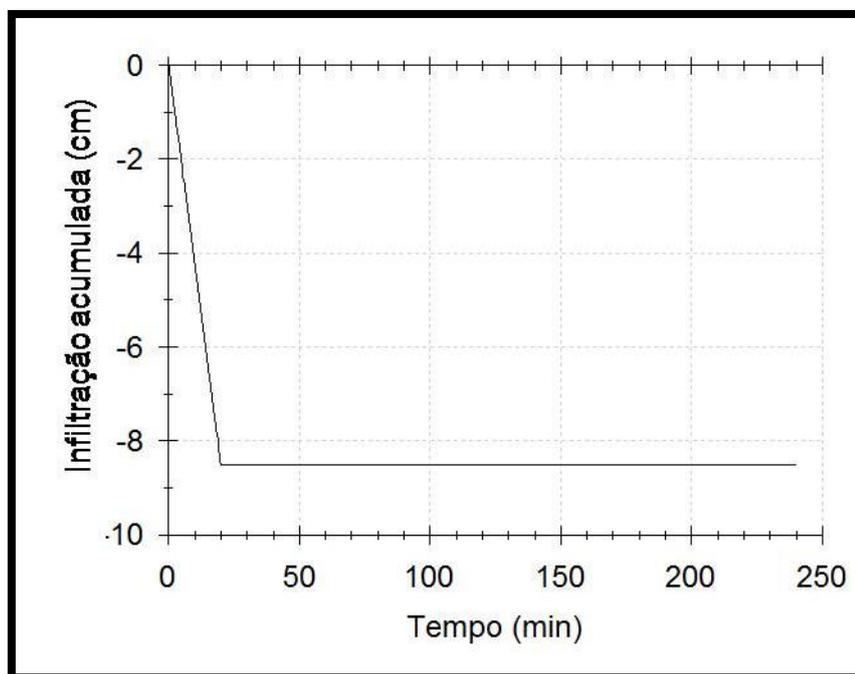


Figura 76 - Infiltração acumulada (cm) x Tempo (min). Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

### 5.2.3 Tensão de sucção (cm) x Tempo (min)

Este gráfico apresenta a variação da tensão de sucção ao longo do tempo na superfície do perfil de materiais inconsolidados. Neste gráfico quando a tensão de sucção se anula observa-se que a precipitação ultrapassou a capacidade de infiltração levando a superfície do material geológico à saturação. Para o evento de 2001, quando isto ocorre o material permanece com tensão de sucção zero até o término da chuva, a partir deste momento ( $t = 20$  minutos) o solo volta a ter tensão de sucção e esta vai aumentando gradativamente com o tempo (exemplo da Unidade a na Figura 77). No evento de 1995, devido a chuva ser de pouca intensidade apenas quatro Unidades (6a, 7, 9 e 10) tiveram uma diminuição na tensão de sucção a ponto de chegarem a zero, porém esta condição não permanece até o fim da chuva, pois a precipitação é bastante variável. A Figura 78 apresenta o gráfico de tensão de sucção x tempo da Unidade 7 para o evento de 1995.

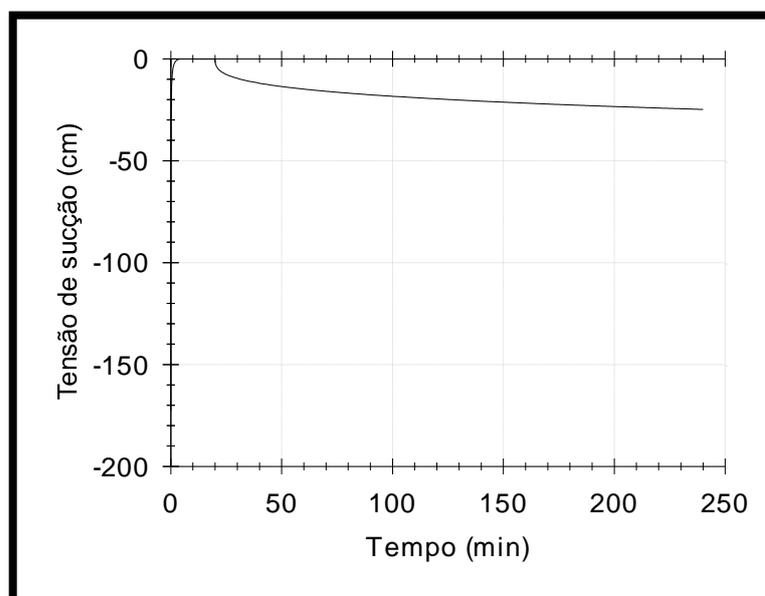


Figura 77 – Tensão de sucção (cm) x Tempo (min). Unidade 4 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

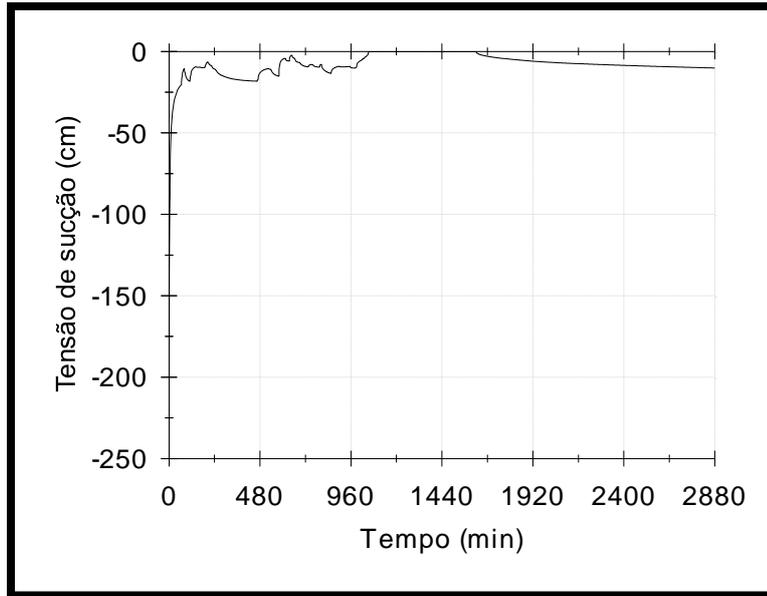


Figura 78 - Tensão de sucção (cm) x Tempo (min). Unidade 7 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

#### 5.2.4 Fluxo *run-off* (cm/min) x Tempo (min) e Fluxo *run-off* acumulado (cm) x Tempo (min)

No gráfico de fluxo *run-off* x tempo observa-se o escoamento superficial (*run-off*) ao longo do tempo. Observa-se que para as Unidades onde a tensão de sucção chegou a zero houve escoamento superficial. Nas Unidades em que o solo permanece na condição não-saturada durante todo o evento não há registro de *run-off*. A Figura 79 apresenta o gráfico para a Unidade 7 sendo possível observar o comportamento em relação ao gráfico da figura 72.

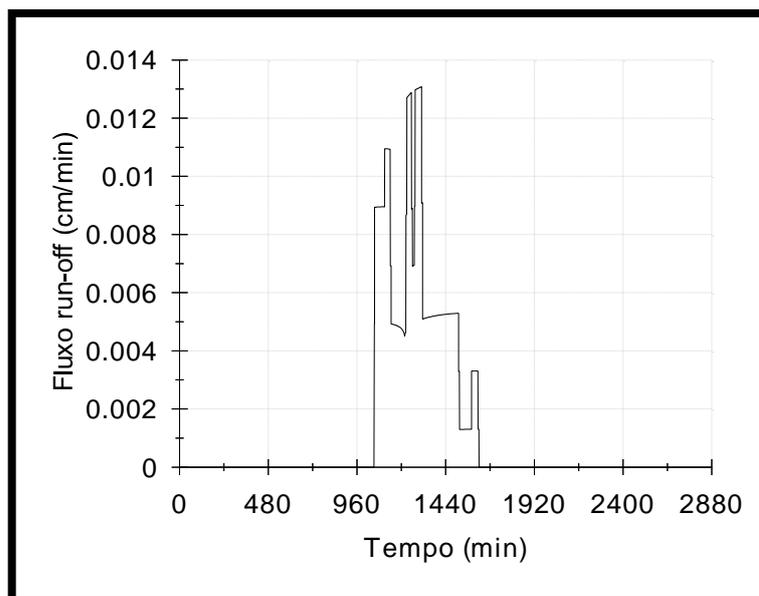


Figura 79 – Infiltração (cm/min) x Tempo (min). Unidade 7 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

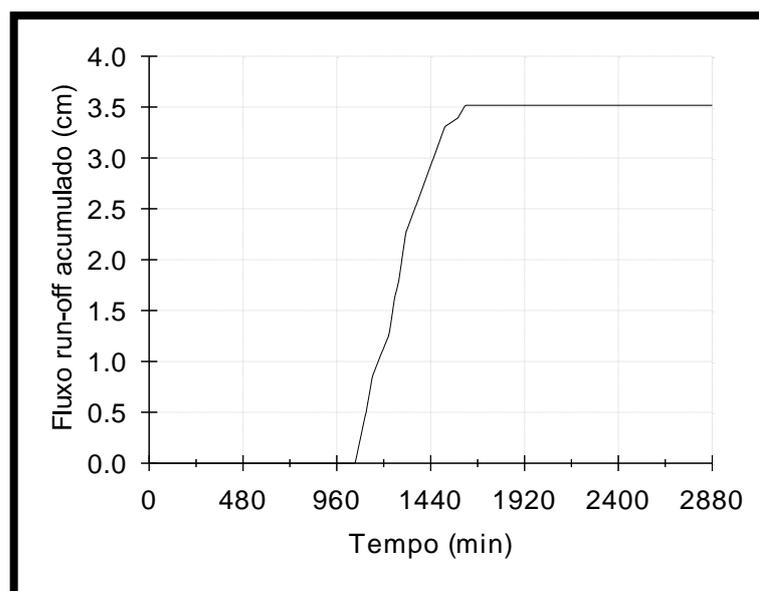


Figura 80 – Infiltração acumulada (cm) x Tempo (min). Unidade 7 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

### 5.2.5 Armazenamento de água no solo (cm) x Tempo (min)

Este gráfico apresenta a quantidade de água armazenada ao longo do tempo no perfil de materiais inconsolidados. Observa-se que para os casos em que houve

escoamento superficial a quantidade de água armazenada é menor que a quantidade precipitada. A Figura 81 apresenta o resultado obtido para a Unidade 8.

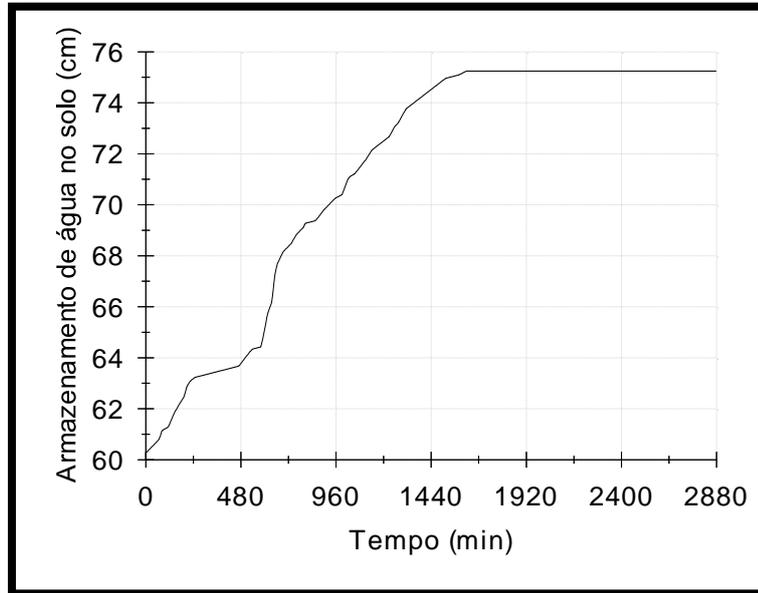


Figura 81 – Armazenamento de água no solo (cm) x Tempo (min). Unidade 8 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

### 5.2.6 Umidade volumétrica média ( $\theta_M$ ) e umidade volumétrica na profundidade $z$ ( $\theta(z)$ )

A partir dos dados de umidade volumétrica obtidos nos perfis de umidade volumétrica x tempo foi possível calcular a  $\theta_M$  para cada tempo desejado, assim como, determinar a umidade volumétrica de uma profundidade específica ( $\theta(z)$ ).

Por correlações de índices físicos discutidos no capítulo 3 (equações 74 e 75) com o valor da umidade volumétrica média é possível determinar o peso específico médio correspondente. Com os valores de  $\theta$  em uma profundidade específica tem-se por relações explicadas no capítulo de metodologia os valores de coesão e ângulo de atrito a serem utilizados no cálculo de fator de segurança. Nas Tabela 21 e Tabela 22 é apresentado o resumo dos dados encontrados nesta fase.

Tabela 21 - Valores de peso específico médio, coesão e ângulo de atrito que serão utilizados no cálculo do fator de segurança para o evento de 2001.

Evento de 5 de fevereiro de 2001								
Unidade	Tempo (min)	z (cm)	$\theta_M$	$\gamma_M$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\theta(z)$	Sr (%)	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
1	20	50	0,2851	14,451	0,1614	29,35	14,25	27,47
		75	0,2426	15,926	0,276	50,18	5,18	29,51
	60	50	0,2832	14,432	0,1692	30,76	13,97	27,54
		75	0,2413	15,913	0,2829	51,44	5,06	29,60
	120	50	0,2827	14,427	0,1732	31,49	13,83	27,57
		75	0,241	15,910	0,2859	51,98	5,01	29,64
	240	50	0,2822	14,422	0,176	32,00	13,73	27,60
		75	0,2406	15,906	0,2891	52,56	4,95	29,68
2	20	50	0,3195	16,695	0,2809	51,07	5,65	29,01
		150	0,2739	17,039	0,2509	51,73	9,76	28,07
	60	50	0,3178	16,678	0,2874	52,25	5,56	29,02
		150	0,2734	17,034	0,2526	52,08	9,69	28,08
	120	50	0,3172	16,672	0,2904	52,80	5,51	29,03
		150	0,2733	17,033	0,2547	52,52	9,60	28,10
	240	50	0,3166	16,666	0,2938	53,42	5,46	29,03
		150	0,258	16,880	0,258	53,20	9,47	28,13
3	20	50	0,3659	15,459	0,2244	41,56	6,09	28,08
		70	0,3077	16,577	0,2759	50,16	5,18	29,51
		170	0,2746	17,046	0,3002	61,90	7,74	28,48
	60	50	0,361	15,410	0,3589	66,46	3,75	29,32
		70	0,3061	16,561	0,2829	51,44	5,06	29,60
		170	0,2739	17,039	0,3002	61,90	7,74	28,48
	120	50	0,3254	15,054	0,4661	86,31	1,89	30,32
		70	0,3057	16,557	0,2859	51,98	5,01	29,64
		170	0,2738	17,038	0,3002	61,90	7,74	28,48
	240	50	0,2913	14,713	0,4436	82,15	2,28	30,11
		70	0,3053	16,553	0,2891	52,56	4,95	29,68
		170	0,2738	17,038	0,3001	61,88	7,75	28,48
4	20	50	0,3195	16,695	0,2781	50,56	5,15	29,79
		150	0,2244	16,544	0,1003	20,68	15,91	26,83
	60	50	0,3176	16,676	0,283	51,45	5,06	29,86
		150	0,2238	16,538	0,1003	20,68	15,91	26,83
	120	50	0,317	16,670	0,2863	52,05	5,00	29,90
		150	0,2849	17,149	0,2554	52,66	9,57	28,11
240	50	0,3163	16,663	0,29	52,73	4,94	29,95	
	150	0,2236	16,536	0,1003	20,68	15,91	26,83	
5a	20	70	0,2722	16,222	0,2779	50,53	5,15	29,54

		90	0,2677	16,977	0,2629	54,21	10,13	28,17
	60	70	0,2709	16,209	0,2829	51,44	5,06	29,60
		90	0,267	16,970	0,2711	55,90	9,83	28,24
	120	70	0,2704	16,204	0,2862	52,04	5,00	29,64
		90	0,267	16,970	0,276	56,91	9,64	28,28
	240	70	0,2699	16,199	0,2898	52,69	4,94	29,69
		90	0,2672	16,972	0,2838	58,52	9,35	28,34
<hr/>								
		20	0,5367	16,967	0,5035	91,55	2,25	30,85
	20	40	0,3596	17,096	0,2757	50,13	5,19	29,51
		50	0,3403	17,703	0,2509	51,73	9,76	28,07
		20	0,3891	15,491	0,4836	87,93	2,95	30,66
	60	40	0,3567	17,067	0,2809	51,07	5,10	29,58
		50	0,3382	17,682	0,2528	52,12	9,68	28,08
		20	0,3443	15,043	0,4425	80,45	4,40	30,26
	120	40	0,3559	17,059	0,2843	51,69	5,04	29,62
		50	0,3379	17,679	0,2554	52,66	9,57	28,11
		20	0,2946	14,546	0,4046	73,56	5,74	29,90
	240	40	0,3352	16,852	0,3981	72,38	3,05	31,07
		50	0,3322	17,622	0,2605	53,71	9,37	28,15
<hr/>								
		20	0,2558	14,158	0,1555	28,27	14,52	27,50
		40	0,2067	15,567	0,3071	55,84	4,64	29,91
		20	0,2524	14,124	0,1621	29,47	14,29	27,56
	60	40	0,2051	15,551	0,3138	57,05	4,52	29,99
		20	0,2511	14,111	0,1661	30,20	14,14	27,60
	120	40	0,2046	15,546	0,3195	58,09	4,42	30,07
		20	0,2497	14,097	0,1674	30,44	14,10	27,61
	240	40	0,2042	15,542	0,3261	59,29	4,31	30,15
<hr/>								
		25	0,4019	17,519	0,151	27,45	7,36	27,92
	20	60	0,3995	17,495	0,1521	29,25	7,19	28,05
		25	0,3946	17,446	0,314	57,09	4,52	30,00
	60	240	0,3865	17,365	0,4411	84,83	1,86	31,94
<hr/>								
		50	0,3704	15,504	0,201	37,22	6,50	27,86
		100	0,287	14,670	0,1848	34,22	6,78	27,71
		50	0,3622	15,422	0,3284	60,81	4,28	29,04
	60	100	0,2855	14,655	0,19	35,19	6,69	27,76
		50	0,3198	14,998	0,3569	66,09	3,79	29,30
	120	100	0,2842	14,642	0,2006	37,15	6,51	27,86
		50	0,2804	14,604	0,3158	58,48	4,50	28,92
	240	100	0,2839	14,639	0,2142	39,67	6,27	27,98
<hr/>								
		50	0,1125	13,625	0,1003	19,29	40,39	35,96
		100	0,1065	13,565	0,1003	19,29	40,39	35,96
		50	0,1119	13,619	0,1003	19,29	40,39	35,96
	60	100	0,1061	13,561	0,1003	19,29	40,39	35,96
		50	0,1115	13,615	0,1003	19,29	40,39	35,96
	120							

		100	0,106	13,560	0,1003	19,29	40,39	35,96
	240	50	0,1112	13,612	0,1003	19,29	40,39	35,96
		100	0,1058	13,558	0,1003	19,29	40,39	35,96
10	20	50	0,2538	13,538	0,2005	40,10	6,15	28,81
		100	0,2274	13,274	0,2005	40,10	6,15	28,81
	60	50	0,2529	13,529	0,2005	40,10	6,15	28,81
		100	0,2269	13,269	0,2005	40,10	6,15	28,81
	120	50	0,2526	13,526	0,2005	40,10	6,15	28,81
		100	0,2268	13,268	0,2005	40,10	6,15	28,81
	240	50	0,2523	13,523	0,2005	40,10	6,15	28,81
		100	0,2266	13,266	0,2005	40,10	6,15	28,81

Tabela 22 - Valores de peso específico médio, coesão e ângulo de atrito que serão utilizados no cálculo do fator de segurança para o evento de 1995.

Evento de 13-14 de outubro de 1995								
Unidade	Tempo (horas)	z (cm)	$\theta_M$	$Y_M$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\theta(z)$	Sr (%)	C (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
1	27	50	0,3780	15,380	0,4228	76,87	4,93	29,84
		75	0,3455	16,955	0,2933	53,33	4,88	29,73
	36	50	0,3184	14,784	0,3949	71,80	5,93	29,59
		75	0,3361	16,861	0,4150	75,45	2,76	31,28
	48	50	0,2838	14,438	0,3615	65,73	7,12	29,29
		75	0,3055	16,555	0,4369	79,44	2,37	31,56
2	27	50	0,3831	17,331	0,4594	83,53	3,02	29,34
		150	0,3165	17,465	0,2727	56,23	8,87	28,25
	36	50	0,3316	16,816	0,4536	82,47	3,10	29,32
		150	0,3164	17,464	0,2726	56,21	8,87	28,25
	48	50	0,2978	16,478	0,4424	80,44	3,27	29,30
		150	0,3163	17,463	0,2714	55,96	8,92	28,24
3	27	50	0,2927	14,727	0,4292	79,48	2,53	29,97
		70	0,3003	16,503	0,4680	85,09	1,83	31,96
		170	0,3117	17,417	0,2727	56,23	8,87	28,25
	36	50	0,2409	14,209	0,3870	71,67	3,26	29,58
		70	0,2825	16,325	0,4622	84,04	1,93	31,88
		170	0,3116	17,416	0,2726	56,21	8,87	28,25
	48	50	0,2136	13,936	0,3514	65,07	3,88	29,25
		70	0,2519	16,019	0,4513	82,05	2,12	31,74
		170	0,3139	17,439	0,3714	76,58	4,84	29,06

4	27	50	0,3832	17,332	0,4370	79,45	2,37	31,96
		150	0,2656	16,956	0,1003	20,68	15,91	26,83
	36	50	0,3302	16,802	0,4317	78,49	2,46	31,89
		150	0,2664	16,964	0,1003	20,68	15,91	26,83
	48	50	0,2988	16,488	0,4201	76,38	2,67	31,73
		150	0,3487	17,787	0,3723	76,76	4,80	29,07
5a	27	70	0,3586	17,086	0,2861	52,02	5,01	29,64
		90	0,3399	17,699	0,2787	57,46	9,54	28,30
	36	70	0,3406	16,906	0,4037	73,40	2,95	31,14
		90	0,3396	17,696	0,2767	57,05	9,62	28,28
	48	70	0,3133	16,633	0,4284	77,89	2,52	31,45
		90	0,3377	17,677	0,4335	89,38	3,73	29,58
6	27	20	0,3454	15,054	0,4766	86,65	3,20	30,59
		40	0,4390	17,890	0,5500	100,00	0,40	33,00
		50	0,4494	18,794	0,5200	100,00	0,40	30,29
	36	20	0,3303	14,903	0,4753	86,42	3,24	30,58
		40	0,4276	17,776	0,5500	100,00	0,40	33,00
		50	0,4404	18,704	0,5200	100,00	0,40	33,00
	48	20	0,3170	14,770	0,4568	83,05	3,90	30,40
		40	0,4176	17,676	0,5500	100,00	0,40	33,00
		50	0,4325	18,625	0,5200	100,00	0,40	33,00
6a	27	20	0,4557	16,157	0,5027	91,40	2,28	30,84
		40	0,4977	18,477	0,5500	100,00	0,40	33,00
	36	20	0,4300	15,900	0,5500	100,00	0,61	31,30
		40	0,4856	18,356	0,5500	100,00	0,40	33,00
	48	20	0,4106	15,706	0,5500	100,00	0,61	31,30
		40	0,4752	18,252	0,5500	100,00	0,40	33,00
7	27	25	0,5500	19,000	0,5500	100,00	0,40	33,00
	36	25	0,5362	18,862	0,5500	100,00	0,40	33,00
	48	25	0,5207	18,707	0,5500	100,00	0,40	33,00
8	27	50	0,2813	14,613	0,2966	54,93	4,84	28,75
		100	0,3417	15,217	0,5400	100,00	0,60	31,00
	36	50	0,2312	14,112	0,2676	49,56	5,34	28,48
		100	0,3373	15,173	0,5400	100,00	0,60	31,00
	48	50	0,2109	13,909	0,2611	48,35	5,45	28,42
		100	0,3336	15,136	0,5400	100,00	0,60	31,00
9	27	50	0,1414	13,914	0,1003	19,29	40,39	35,96

		100	0,1211	13,711	0,1003	19,29	40,39	35,96
	36	50	0,1408	13,908	0,1003	19,29	40,39	35,96
		100	0,1207	13,707	0,1003	19,29	40,39	35,96
	48	50	0,1405	13,905	0,1003	19,29	40,39	35,96
		100	0,1206	13,706	0,1003	19,29	40,39	35,96
	27	50	0,4410	15,410	0,4282	85,64	1,78	31,99
		100	0,3485	14,485	0,2005	40,10	6,15	28,81
10	36	50	0,3980	14,980	0,4095	81,90	2,14	31,73
		100	0,3482	14,482	0,2005	40,10	6,15	28,81
	48	50	0,3730	14,730	0,3871	77,42	2,57	31,42
		100	0,3480	14,480	0,2005	40,10	6,15	28,81

Onde,  $z$  a profundidade (cm);  $\theta_M$  a umidade volumétrica média;  $\gamma_M$  o peso específico médio ( $\text{kN/m}^3$ ),  $\theta(z)$  a umidade volumétrica na profundidade  $z$ ;  $Sr$  o grau de saturação (%),  $c$  a coesão total ( $\text{kN/m}^2$ ) e  $\phi$  o ângulo de atrito ( $^\circ$ ).

### 5.3 Obtenção do Fator de Segurança 3D

O fator de segurança tridimensional foi calculado para quatro cenários diferentes, considerando cada evento de chuva.

Foram definidos dois planos de ruptura potenciais. O primeiro deles mais superficial representando a primeira descontinuidade geotécnica de cada Unidade de material inconsolidado, ou seja, o plano de ruptura encontra-se no primeiro contato entre diferentes materiais inconsolidados, da superfície para o interior do perfil. O segundo plano de ruptura foi definido na segunda descontinuidade geotécnica, sendo um pouco mais profunda.

Foi calculado o fator de segurança considerando a coesão que foi determinada a partir da umidade volumétrica na profundidade do plano de ruptura considerado (chamado de coesão natural nas tabelas seguintes), conforme foi

apresentado na metodologia deste trabalho. E, além disso, também foi calculado um fator de segurança considerando um valor de coesão mínimo (0,1) para os dois tipos de perfis, o mais superficial e o mais profundo.

Para o evento de 5 de fevereiro de 2001 o fator de segurança foi calculado para o tempo de 120 minutos e para o evento de 13-14 de outubro de 1995 para o tempo de 48 horas.

As tabelas a seguir apresentam o resultado do fator de segurança 3D encontrado para grid para os quatro cenários considerados e ao final tem-se o resultado final do fator de segurança para a área como um todo.

.Tabela 23 – Fator de segurança 3D da área A

Área A											
Grid	Unidade	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	05 Fevereiro 2001				13-14 Outubro 1995			
				Coesão natural		Coesão mínima		Coesão natural		Coesão mínima	
				Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo
8,2	U1	6	42	4,59	1,57	0,68	0,72	2,72	1,16	0,73	0,78
8,3	U1	34	108	4,91	1,75	0,80	0,86	2,96	1,32	0,86	0,93
8,4a	U1	38	110	2,65	1,16	0,68	0,74	1,74	0,99	0,73	0,80
8,4b	U4	38	110	1,36	1,26	0,75	0,69	1,13	0,99	0,81	0,72
8,5	U4	39	113	1,95	1,81	0,74	0,68	1,43	1,25	0,79	0,70
9,2	U1	13	65	4,59	1,57	0,68	0,72	2,72	1,16	0,73	0,78
9,3	U1	39	113	4,59	1,57	0,68	0,72	2,72	1,16	0,73	0,78
9,4a	U1	35	122	1,40	0,98	0,77	0,84	1,15	0,97	0,83	0,91
9,4b	U4	35	122	1,97	1,83	0,87	0,80	1,51	1,32	0,93	0,83
9,5	U4	38	114	1,99	1,85	0,77	0,70	1,47	1,28	0,82	0,73
9,6	U4	31	102	2,32	2,16	0,99	0,90	1,76	1,54	1,06	0,94
10,2	U1	34	104	4,91	1,75	0,80	0,86	2,96	1,32	0,86	0,93
10,3a	U1	43	109	4,33	1,44	0,59	0,63	2,54	1,04	0,63	0,68
10,3b	U4	43	109	0,64	0,60	0,62	0,57	0,68	0,61	0,66	0,60
10,4a	U1	34	120	1,00	0,91	0,79	0,87	0,96	0,95	0,85	0,93
10,4b	U4	34	120	2,13	1,98	0,90	0,82	1,62	1,41	0,96	0,86
10,5	U4	33	104	2,20	2,04	0,91	0,84	1,66	1,45	0,98	0,87
10,6	U4	34	103	2,15	2,00	0,88	0,80	1,62	1,41	0,94	0,84
10,7	U4	42	107	1,85	1,72	0,66	0,61	1,34	1,16	0,71	0,63
10,8	U4	17	104	4,03	3,74	1,92	1,77	3,18	2,78	2,07	1,84
10,9a	U4	20	115	2,36	2,19	1,62	1,49	2,13	1,89	1,74	1,56
10,9b	U8	20	115	2,52	2,31	1,59	1,48	2,99	1,75	1,53	1,69

10,10	U8	24	118	2,68	2,44	1,33	1,23	3,40	1,49	1,28	1,40
11,2	U1	31	93	5,30	1,93	0,92	0,98	3,22	1,48	0,98	1,06
11,3a	U1	43	91	3,89	1,35	0,59	0,63	2,32	1,00	0,64	0,68
11,3b	U4	43	91	0,81	0,75	0,63	0,58	0,77	0,69	0,68	0,61
11,4	U4	30	97	2,40	2,23	1,03	0,95	1,83	1,60	1,11	0,98
11,5	U4	29	93	2,50	2,32	1,08	0,99	1,91	1,67	1,16	1,03
11,6	U4	35	100	2,10	1,96	0,85	0,78	1,58	1,37	0,91	0,81
11,7	U4	36	93	2,08	1,94	0,83	0,76	1,55	1,35	0,89	0,79
11,8a	U4	21	109	3,21	2,98	1,54	1,41	2,53	2,22	1,65	1,47
11,8b	U8	21	109	1,54	1,45	1,47	1,38	1,53	1,57	1,41	1,57
11,9a	U4	29	110	1,25	1,16	1,04	0,97	1,23	1,10	1,12	1,01
11,9b	U8	29	110	2,03	1,85	1,04	0,97	2,56	1,17	1,01	1,10
11,10	U8	24	121	2,71	2,46	1,34	1,25	3,44	1,51	1,30	1,41
12,2	U1	31	98	5,24	1,91	0,91	0,97	3,18	1,46	0,97	1,05
12,3a	U1	40	91	3,61	1,34	0,66	0,70	2,21	1,04	0,70	0,76
12,3b	U4	40	91	1,01	0,94	0,70	0,65	0,92	0,81	0,76	0,68
12,4	U4	34	93	2,18	2,03	0,89	0,82	1,64	1,43	0,96	0,85
12,5	U4	36	91	2,10	1,95	0,83	0,76	1,56	1,36	0,89	0,79
12,6	U4	34	93	2,18	2,03	0,89	0,82	1,64	1,43	0,96	0,85
12,7	U4	32	88	2,33	2,17	0,98	0,90	1,77	1,54	1,05	0,93
12,8a	U4	28	96	2,26	2,10	1,12	1,03	1,80	1,58	1,20	1,07
12,8b	U8	28	96	1,31	1,22	1,07	1,01	1,41	1,16	1,03	1,14
12,9	U8	25	118	2,58	2,34	1,27	1,18	3,28	1,42	1,22	1,33
13,3a	U1	37	95	2,31	1,12	0,71	0,77	1,58	0,98	0,76	0,83
13,3b	U4	37	95	1,53	1,42	0,79	0,72	1,24	1,09	0,84	0,75
13,4	U4	36	87	2,12	1,97	0,84	0,77	1,58	1,38	0,91	0,80
13,5	U4	40	92	1,93	1,80	0,72	0,66	1,42	1,23	0,77	0,68
13,6	U4	32	91	2,31	2,14	0,97	0,89	1,75	1,52	1,04	0,92
13,7	U4	36	90	2,10	1,95	0,84	0,76	1,57	1,36	0,90	0,80

13,8	U4	41	90	1,91	1,78	0,70	0,64	1,39	1,21	0,75	0,66
$\Sigma_x \Sigma_y$				<b>2,43</b>	<b>1,70</b>	<b>0,86</b>	<b>0,83</b>	<b>1,79</b>	<b>1,26</b>	<b>0,91</b>	<b>0,88</b>

$\alpha$  – declividade (°)

$\beta$  – direção das vertentes (°)

Tabela 24 - Fator de segurança 3D da área B.

Área B											
Grid	Unidade	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	05 Fevereiro 2001				13-14 Outubro 1995			
				Coesão natural		Coesão mínima		Coesão natural		Coesão mínima	
				Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo
7,5	U4	39	117	1,95	1,81	0,74	0,68	1,43	1,25	0,79	0,70
7,6	U4	36	128	2,13	1,98	0,85	0,78	1,59	1,38	0,91	0,81
7,7	U4	32	132	2,40	2,23	1,01	0,92	1,82	1,58	1,08	0,96
7,8	U4	36	134	2,20	2,04	0,87	0,80	1,64	1,42	0,94	0,83
8,5	U4	39	113	1,94	1,80	0,74	0,67	1,43	1,24	0,79	0,70
8,6	U4	36	112	2,06	1,91	0,82	0,75	1,53	1,33	0,88	0,78
8,7	U4	31	122	2,36	2,20	1,00	0,92	1,80	1,57	1,08	0,96
8,8	U4	32	129	2,36	2,19	0,99	0,91	1,79	1,56	1,06	0,94
8,9	U4	19	135	3,99	3,71	1,88	1,73	3,13	2,74	2,02	1,80
8,10	U4	15	130	4,85	4,51	2,34	2,15	3,84	3,36	2,51	2,24
9,6	U4	31	102	2,33	2,17	0,99	0,91	1,77	1,55	1,06	0,94
9,7	U4	30	112	2,38	2,22	1,02	0,94	1,82	1,59	1,10	0,98
9,8	U4	32	106	2,26	2,10	0,95	0,87	1,71	1,49	1,02	0,90
9,9a	U4	19	110	3,43	3,18	1,71	1,57	2,74	2,40	1,83	1,63
9,9b	U8	19	110	1,79	1,68	1,63	1,54	1,83	1,76	1,58	1,75
9,10a	U4	15	131	2,56	2,38	2,31	2,14	2,62	2,34	2,48	2,23
9,10b	U8	15	131	4,20	3,84	2,30	2,14	5,20	2,56	2,22	2,43
10,7	U4	42	107	1,85	1,72	0,66	0,61	1,34	1,16	0,71	0,63

10,8	U4	17	104	4,04	3,76	1,93	1,77	3,19	2,79	2,07	1,84
10,9a	U4	20	115	2,81	2,61	1,61	1,49	2,36	2,08	1,73	1,55
10,9b	U8	20	115	2,10	1,95	1,56	1,47	2,35	1,70	1,51	1,67
10,10	U8	24	118	2,65	2,41	1,31	1,22	3,36	1,47	1,27	1,38
<b><math>\Sigma_x \Sigma_y</math></b>				<b>2,48</b>	<b>2,30</b>	<b>1,19</b>	<b>1,09</b>	<b>2,03</b>	<b>1,70</b>	<b>1,25</b>	<b>1,15</b>

$\alpha$  – declividade (°)

$\beta$  – direção das vertentes (°)

Tabela 25 - Fator de segurança 3D da área C.

Área C											
Grid	Unidade	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	05 Fevereiro 2001				13-14 Outubro 1995			
				Coesão natural		Coesão mínima		Coesão natural		Coesão mínima	
				Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo
2,6	U1	34	136	4,95	1,76	0,81	0,87	2,98	1,33	0,87	0,94
2,7	U1	40	133	4,53	1,54	0,65	0,70	2,68	1,12	0,70	0,75
2,8a	U1	34	131	4,50	1,66	0,80	0,86	2,75	1,28	0,86	0,93
2,8b	U4	34	131	0,98	0,91	0,86	0,79	0,99	0,88	0,92	0,83
3,5	U1	36	137	4,80	1,68	0,76	0,81	2,87	1,26	0,81	0,87
3,6	U1	9	137	4,57	1,56	0,67	0,72	2,71	1,15	0,72	0,78
3,7a	U1	31	125	3,91	1,61	0,89	0,96	2,50	1,33	0,96	1,04
3,7b	U4	31	125	1,37	1,27	0,97	0,89	1,25	1,11	1,04	0,93
3,8a	U1	34	137	1,41	0,99	0,79	0,86	1,16	0,98	0,84	0,92
3,8b	U4	34	137	1,97	1,83	0,88	0,81	1,53	1,33	0,95	0,84
3,9	U4	32	135	2,27	2,11	0,95	0,87	1,72	1,50	1,02	0,91
4,5	U1	5	140	4,69	1,63	0,72	0,77	2,80	1,21	0,77	0,83
4,6a	U1	30	130	3,34	1,52	0,92	1,00	2,23	1,31	0,99	1,08
4,6b	U4	30	130	1,62	1,51	1,01	0,93	1,41	1,24	1,08	0,97

4,7a	U1	39	131	0,84	0,75	0,65	0,70	0,79	0,78	0,70	0,76
4,7b	U4	39	131	1,88	1,75	0,73	0,67	1,39	1,21	0,79	0,70
4,8	U4	36	140	2,09	1,94	0,83	0,76	1,56	1,36	0,89	0,79
4,9	U4	32	142	2,31	2,15	0,97	0,89	1,75	1,53	1,04	0,93
4,10	U4	29	151	2,63	2,45	1,14	1,05	2,02	1,76	1,23	1,09
5,5a	U1	36	125	2,53	1,18	0,73	0,79	1,71	1,03	0,79	0,85
5,5b	U4	36	125	1,49	1,38	0,81	0,74	1,23	1,08	0,87	0,77
5,6	U4	37	130	2,01	1,87	0,79	0,72	1,50	1,30	0,85	0,75
5,7	U4	38	128	1,97	1,83	0,76	0,70	1,46	1,27	0,82	0,72
5,8	U4	30	135	2,40	2,23	1,03	0,95	1,83	1,60	1,11	0,98
5,9	U4	29	145	2,55	2,37	1,11	1,02	1,95	1,70	1,19	1,06
5,10	U4	28	161	2,94	2,74	1,29	1,19	2,26	1,97	1,39	1,23
5,11	U4	35	168	2,58	2,39	1,04	0,95	1,93	1,68	1,12	0,99
6,6	U4	36	130	2,06	1,91	0,82	0,75	1,53	1,33	0,88	0,78
6,7	U4	35	128	2,10	1,95	0,85	0,78	1,57	1,37	0,91	0,81
6,8	U4	40	135	1,92	1,78	0,71	0,65	1,40	1,22	0,77	0,68
6,9	U4	30	145	2,47	2,30	1,06	0,97	1,89	1,65	1,14	1,01
6,10	U4	32	140	2,30	2,14	0,97	0,88	1,74	1,52	1,04	0,92
6,11	U4	28	168	3,19	2,96	1,40	1,28	2,45	2,14	1,50	1,34
7,7	U4	32	132	2,26	2,10	0,95	0,87	1,71	1,49	1,02	0,90
7,8	U4	36	134	2,06	1,92	0,82	0,75	1,54	1,34	0,88	0,78
7,9	U4	22	143	3,26	3,03	1,51	1,39	2,55	2,23	1,62	1,44
7,10	U4	24	134	2,93	2,72	1,33	1,22	2,27	1,99	1,43	1,27
7,11a	U4	34	144	2,19	2,03	0,91	0,83	1,65	1,44	0,97	0,86
7,11b	U8	34	144	0,91	0,84	0,88	0,82	0,96	0,86	0,95	0,85
8,9	U4	19	135	3,65	3,39	1,72	1,58	2,87	2,51	1,85	1,65
8,10	U4	15	130	4,55	4,23	2,20	2,02	3,61	3,16	2,36	2,10
8,11a	U4	15	135	3,38	3,14	2,19	2,02	2,98	2,64	2,35	2,11
8,11b	U8	15	135	3,38	3,14	2,19	2,02	2,98	2,64	2,35	2,11

$\Sigma_x \Sigma_y$	<b>2,38</b>	<b>1,90</b>	<b>0,94</b>	<b>0,89</b>	<b>1,77</b>	<b>1,41</b>	<b>1,01</b>	<b>0,94</b>
---------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

$\alpha$  – declividade (°)

$\beta$  – direção das vertentes (°)

Tabela 26 - Fator de segurança 3D da área D.

Área D											
Grid	Unidade	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	05 Fevereiro 2001				13-14 Outubro 1995			
				Coesão natural		Coesão mínima		Coesão natural		Coesão mínima	
				Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo
6,18a	U2	48	222	1,03	0,78	0,51	0,48	0,82	0,76	0,52	0,49
6,18b	U2	48	222	1,30	0,93	0,51	0,49	0,98	0,89	0,52	0,49
6,19	U4	27	243	2,78	2,58	1,23	1,13	2,14	1,87	1,32	1,17
7,18a	U2	35	218	0,86	0,80	0,79	0,76	0,84	0,80	0,80	0,77
7,18b	U4	35	218	1,27	1,18	0,83	0,77	1,13	1,00	0,89	0,80
7,18c	U10	35	218	1,95	1,38	0,80	0,80	1,32	1,33	0,89	0,79
7,19a	U2	39	226	1,91	1,35	0,71	0,67	1,43	1,29	0,72	0,67
7,19b	U10	39	226	0,87	0,78	0,68	0,68	0,83	0,77	0,76	0,68
8,17	U10	39	223	2,54	1,63	0,71	0,69	1,47	1,55	0,78	0,69
8,18	U10	32	235	2,97	1,95	0,93	0,92	1,79	1,87	1,03	0,92
8,19a	U2	37	227	1,29	1,02	0,75	0,71	1,08	1,00	0,76	0,72
8,19b	U10	37	227	1,87	1,31	0,75	0,74	1,25	1,26	0,83	0,74
9,17	U10	39	180	3,06	1,96	0,86	0,84	1,77	1,87	0,94	0,84
9,18	U10	33	239	2,94	1,93	0,91	0,89	1,77	1,84	1,01	0,89
9,19	U10	24	230	3,72	2,51	1,29	1,27	2,33	2,40	1,42	1,27
$\Sigma_x \Sigma_y$				<b>1,77</b>	<b>1,27</b>	<b>0,79</b>	<b>0,75</b>	<b>1,28</b>	<b>1,20</b>	<b>0,84</b>	<b>0,75</b>

$\alpha$  – declividade (°)

$\beta$  – direção das vertentes (°)

Tabela 27 - Fator de segurança 3D da área E.

Área E											
Grid	Unidade	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	05 Fevereiro 2001				13-14 Outubro 1995			
				Coesão natural		Coesão mínima		Coesão natural		Coesão mínima	
				Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo
8,30	U7	34	139	3,40	3,40	1,00	1,00	1,26	1,26	1,11	1,11
8,31	U7	21	140	5,14	5,14	1,76	1,76	2,17	2,17	1,96	1,96
9,30	U7	25	142	4,31	4,31	1,42	1,42	1,77	1,77	1,58	1,58
9,31	U7	20	140	5,38	5,38	1,85	1,85	2,29	2,29	2,07	2,07
9,32	U7	29	135	4,01	4,01	1,26	1,26	1,58	1,58	1,41	1,41
10,30	U7	18	179	5,39	5,39	1,89	1,89	2,33	2,33	2,11	2,11
10,31	U7	32	137	3,62	3,62	1,09	1,09	1,38	1,38	1,22	1,22
10,32	U7	28	130	4,36	4,36	1,39	1,39	1,73	1,73	1,55	1,55
11,30a	U7	15	175	3,42	3,42	2,20	2,20	2,54	2,54	2,47	2,47
11,30b	U4	15	175	3,85	3,06	2,20	2,02	3,24	2,60	2,36	2,10
11,31a	U7	31	130	2,99	2,99	1,20	1,20	1,45	1,45	1,34	1,34
11,31b	U4	31	130	1,72	1,42	1,16	1,07	1,55	1,29	1,25	1,12
11,32	U7	25	136	4,53	4,53	1,49	1,49	1,86	1,86	1,66	1,66
12,30	U4	39	150	2,00	1,47	0,76	0,69	1,47	1,09	0,81	0,72
12,31a	U7	35	138	1,89	1,89	0,93	0,93	1,11	1,11	1,05	1,05
12,31b	U4	35	138	1,76	1,37	0,93	0,85	1,43	1,13	0,99	0,88
$\Sigma_x \Sigma_y$				<b>3,10</b>	<b>2,34</b>	<b>1,31</b>	<b>1,20</b>	<b>1,72</b>	<b>1,50</b>	<b>1,45</b>	<b>1,28</b>

 $\alpha$  – declividade (°) $\beta$  – direção das vertentes (°)

Tabela 28 - Fator de segurança 3D da área F.

Área F											
Grid	Unidade	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	05 Fevereiro 2001				13-14 Outubro 1995			
				coesão natural		coesão mínima		coesão natural		coesão mínima	
				Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo
17,27	U4	10	227	13,39	10,29	6,59	6,03	10,67	8,31	7,07	6,28
17,18	U4	10	240	9,85	7,57	4,85	4,44	7,85	6,12	5,20	4,62
17,29	U4	19	297	3,67	2,80	1,73	1,59	2,89	2,23	1,86	1,65
17,30a	U4	28	292	2,39	1,82	1,11	1,02	1,87	1,44	1,19	1,06
17,30b	U8	28	292	1,18	1,10	1,06	1,00	1,21	1,14	1,02	1,14
18,26	U4	10	253	8,13	6,25	4,00	3,66	6,48	5,05	4,29	3,81
18,27	U4	16	286	4,27	3,27	2,05	1,88	3,38	2,62	2,20	1,95
18,28	U4	25	299	2,85	2,16	1,29	1,18	2,21	1,69	1,38	1,22
18,29	U4	18	306	4,01	3,06	1,91	1,74	3,16	2,44	2,05	1,81
18,30a	U4	28	302	1,93	1,54	1,13	1,04	1,64	1,32	1,21	1,08
18,30b	U8	28	302	1,65	1,52	1,10	1,03	1,92	1,21	1,06	1,17
18,31	U8	24	302	2,70	2,45	1,33	1,24	3,42	1,50	1,29	1,41
19,27	U4	16	293	4,29	3,28	2,06	1,89	3,39	2,63	2,21	1,96
19,28	U4	25	293	2,81	2,13	1,27	1,16	2,18	1,67	1,36	1,21
19,29	U4	20	292	3,46	2,63	1,62	1,48	2,71	2,09	1,74	1,54
19,30a	U4	28	290	1,59	1,32	1,09	1,01	1,44	1,20	1,17	1,05
19,30b	U8	28	290	1,85	1,69	1,08	1,01	2,25	1,19	1,04	1,14
19,31	U8	24	294	2,64	2,40	1,30	1,21	3,35	1,47	1,26	1,38
$\Sigma_x \Sigma_y$				<b>2,89</b>	<b>2,37</b>	<b>1,50</b>	<b>1,42</b>	<b>2,52</b>	<b>1,90</b>	<b>1,59</b>	<b>1,50</b>

 $\alpha$  – declividade (°) $\beta$  – direção das vertentes (°)

Tabela 29 - Fator de segurança 3D da área G.

Área G											
Grid	Unidade	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	05 Fevereiro 2001				13-14 Outubro 1995			
				coesão natural		coesão mínima		coesão natural		coesão mínima	
				Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo
23,26	U4	12	229	1,91	1,91	0,68	0,68	1,38	1,38	0,73	0,73
23,27	U4	22	245	3,16	3,16	1,46	1,46	2,46	2,46	1,57	1,57
23,28a	U4	33	255	1,95	1,95	0,91	0,91	1,53	1,53	0,98	0,98
23,28b	U3	33	255	1,02	1,07	0,91	0,88	1,11	1,04	0,87	0,96
23,29a	U4	25	253	1,55	1,55	1,24	1,24	1,50	1,50	1,34	1,34
23,29b	U3	25	253	1,78	2,13	1,29	1,24	2,37	1,73	1,24	1,35
24,25a	U5a	22	213	3,12	3,12	1,71	1,71	2,51	2,51	1,83	1,83
24,25b	U4	22	213	1,80	1,80	1,70	1,70	1,88	1,88	1,83	1,83
24,26a	U5a	42	216	1,14	1,14	0,71	0,71	0,97	0,97	0,76	0,76
24,26b	U4	42	216	1,44	1,44	0,72	0,72	1,15	1,15	0,77	0,77
24,27a	U4	39	224	1,99	1,99	0,78	0,78	1,47	1,47	0,83	0,83
24,27b	U3	39	224	0,79	0,79	0,77	0,74	0,79	0,83	0,73	0,81
24,28a	U4	38	247	0,92	0,92	0,74	0,74	0,89	0,89	0,80	0,80
24,28b	U3	38	247	1,19	1,49	0,77	0,74	1,69	1,12	0,74	0,81
24,29	U3	31	268	1,61	2,02	1,05	1,01	2,30	1,53	1,01	1,10
25,24	U5a	20	190	5,30	5,30	2,87	2,87	4,25	4,25	3,08	3,08
25,25	U5a	18	210	4,05	4,05	2,22	2,22	3,26	3,26	2,38	2,38
25,26a	U5a	42	225	1,57	1,57	0,68	0,68	1,16	1,16	0,73	0,73
25,26b	U3	42	225	0,69	0,68	0,68	0,66	0,68	0,73	0,65	0,72
25,27	U3	41	251	1,18	1,53	0,70	0,67	1,77	1,09	0,67	0,73
25,28	U3	38	276	1,37	1,76	0,84	0,81	2,02	1,28	0,81	0,88
25,29	U3	28	275	1,87	2,32	1,24	1,20	2,63	1,78	1,19	1,30

26,22	U5a	12	224	5,29	5,29	2,97	2,97	4,30	4,30	3,18	3,18
26,23	U5a	10	167	3,16	3,16	1,71	1,71	2,54	2,54	1,84	1,84
26,24	U5a	7	190	3,16	3,16	1,71	1,71	2,54	2,54	1,84	1,84
26,25	U5a	4	224	3,16	3,16	1,71	1,71	2,54	2,54	1,84	1,84
26,26a	U5a	29	301	2,93	2,93	1,60	1,60	2,36	2,36	1,72	1,72
26,26b	U3	29	301	1,75	1,81	1,62	1,58	1,85	1,81	1,56	1,71
26,27	U3	55	289	1,05	1,47	0,49	0,47	1,76	0,93	0,47	0,51
26,28	U3	45	280	1,19	1,57	0,67	0,64	1,83	1,09	0,64	0,70
26,29	U3	27	276	1,96	2,42	1,31	1,26	2,74	1,86	1,26	1,37
27,22	U5a	36	221	1,85	1,85	0,87	0,87	1,40	1,40	0,93	0,93
27,23	U5a	8	250	1,71	1,71	0,80	0,80	1,30	1,30	0,86	0,86
27,24	U5a	9	255	1,72	1,72	0,81	0,81	1,30	1,30	0,86	0,86
27,25	U5a	21	302	4,56	4,56	2,46	2,46	3,65	3,65	2,64	2,64
27,26	U5a	22	298	3,99	3,99	2,14	2,14	3,19	3,19	2,29	2,29
<b><math>\Sigma_x \Sigma_y</math></b>				<b>1,84</b>	<b>1,86</b>	<b>1,05</b>	<b>1,01</b>	<b>1,75</b>	<b>1,50</b>	<b>1,11</b>	<b>1,09</b>

$\alpha$  – declividade (°)

$\beta$  – direção das vertentes (°)

Tabela 30 - Fator de segurança 3D da área H.

Área H											
Grid	Unidade	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	05 Fevereiro 2001				13-14 Outubro 1995			
				coesão natural		coesão mínima		coesão natural		coesão mínima	
				Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo
22,2	U4	27	148	2,75	2,75	1,22	1,22	2,12	2,12	1,31	1,31
22,3a	U4	34	152	1,46	1,46	0,92	0,92	1,27	1,27	0,99	0,99
22,3b	U6	34	152	2,94	1,92	0,97	0,92	2,75	1,10	0,97	1,05
22,4	U6	25	163	5,47	3,39	1,44	1,36	5,07	1,66	1,45	1,54

22,5	U6	27	152	5,12	3,16	1,32	1,24	4,75	1,52	1,33	1,41
23,2	U4	22	131	3,16	3,16	1,46	1,46	2,46	2,46	1,57	1,57
23,3a	U4	21	138	2,43	2,43	1,54	1,54	2,12	2,12	1,65	1,65
23,3b	U6	21	138	3,09	2,28	1,58	1,52	2,95	1,77	1,58	1,73
23,3c	U9	21	138	2,21	1,84	1,56	1,51	2,15	1,74	1,56	1,72
23,4	U6	25	157	5,67	3,52	1,50	1,41	5,26	1,72	1,51	1,60
23,5	U6	22	151	5,09	3,14	1,31	1,23	4,72	1,51	1,32	1,40
23,6	U6	11	152	5,12	3,16	1,32	1,24	4,75	1,52	1,33	1,41
24,2	U4	20	88	4,39	4,39	2,06	2,06	3,45	3,45	2,21	2,21
24,3a	U4	17	92	3,60	3,60	2,32	2,32	3,17	3,17	2,49	2,49
24,3b	U9	17	92	5,51	3,87	2,40	2,30	5,21	2,71	2,41	2,62
24,4a	U6	14	135	4,55	3,40	2,41	2,32	4,35	2,71	2,42	2,64
24,4b	U9	14	135	6,44	4,36	2,45	2,34	6,05	2,78	2,46	2,66
24,5a	U6	21	162	6,45	4,10	1,90	1,80	6,00	2,18	1,91	2,04
24,5b	U9	21	162	2,31	2,01	1,81	1,76	2,27	2,02	1,82	2,00
24,6	U6	17	174	4,40	2,70	1,09	1,02	4,07	1,26	1,10	1,16
24,7	U6	18	148	7,17	4,51	2,02	1,90	6,66	2,32	2,03	2,17
25,2	U4	24	97	3,32	3,32	1,51	1,51	2,58	2,58	1,62	1,62
25,3a	U4	15	96	4,05	4,05	2,54	2,54	3,53	3,53	2,73	2,73
25,3b	U6	15	96	4,25	3,34	2,58	2,50	4,10	2,90	2,60	2,85
25,3c	U9	15	96	3,91	3,17	2,57	2,49	3,79	2,88	2,59	2,84
25,4a	U6	25	81	2,54	2,10	1,76	1,71	2,47	1,97	1,77	1,95
25,4b	U9	25	81	6,27	3,98	1,85	1,75	5,84	2,12	1,86	1,99
25,5a	U6	21	133	2,18	1,82	1,54	1,49	2,13	1,72	1,55	1,70
25,5b	U9	21	133	5,25	3,37	1,61	1,52	4,90	1,84	1,62	1,73
25,6a	U6	32	170	4,45	2,80	1,25	1,18	4,14	1,43	1,26	1,34
25,6b	U9	32	170	1,99	1,56	1,19	1,15	1,92	1,34	1,20	1,32
25,7	U6	31	168	5,28	3,23	1,29	1,21	4,88	1,49	1,30	1,37
25,8	U6	19	138	6,53	4,11	1,83	1,72	6,07	2,10	1,84	1,96

26,3a	U4	22	85	2,11	2,11	1,89	1,89	2,15	2,15	2,03	2,03
26,3b	U6	22	85	6,92	4,39	2,02	1,91	6,44	2,32	2,04	2,17
26,4a	U6	19	89	7,22	4,65	2,25	2,13	6,73	2,57	2,26	2,42
26,4b	U9	19	89	3,03	2,53	2,15	2,09	2,96	2,41	2,17	2,38
26,5a	U6	27	90	2,72	2,03	1,43	1,37	2,59	1,60	1,43	1,57
26,5b	U9	27	90	4,48	2,92	1,47	1,39	4,18	1,67	1,47	1,58
26,6	U9	22	133	5,67	3,54	1,54	1,45	5,27	1,78	1,55	1,65
26,7a	U6	34	97	1,50	1,21	0,98	0,95	1,45	1,10	0,98	1,08
26,7b	U9	34	97	3,96	2,45	1,03	0,97	3,67	1,19	1,04	1,10
26,8a	U6	22	171	2,74	2,28	1,93	1,87	2,67	2,16	1,94	2,13
26,8b	U9	22	171	6,64	4,25	2,02	1,91	6,19	2,31	2,03	2,17
26,9	U6	20	142	6,32	3,96	1,75	1,65	5,87	2,01	1,76	1,88
27,5	U6	32	100	4,59	2,80	1,11	1,03	4,25	1,28	1,11	1,17
27,6a	U6	24	93	3,42	2,46	1,60	1,53	3,25	1,80	1,61	1,75
27,6b	U9	24	93	4,36	2,93	1,62	1,54	4,09	1,84	1,63	1,76
27,7a	U6	30	98	1,70	1,39	1,14	1,11	1,65	1,28	1,15	1,26
27,7b	U9	30	98	4,34	2,72	1,20	1,13	4,03	1,38	1,21	1,29
27,8	U9	34	142	4,10	2,49	0,96	0,89	3,79	1,11	0,96	1,01
27,9a	U6	42	168	0,94	0,83	0,77	0,75	0,92	0,86	0,77	0,85
27,9b	U6a	42	168	1,28	1,01	0,78	0,75	1,24	0,87	0,78	0,86
27,9c	U9	42	168	3,54	2,14	0,83	0,77	3,27	0,96	0,83	0,88
28,8	U9	32	84	5,41	3,30	1,30	1,22	5,01	1,51	1,31	1,38
28,9a	U9	18	120	6,58	4,17	1,92	1,81	6,12	2,20	1,93	2,06
28,9b	U6a	18	120	2,06	1,89	1,82	1,77	2,05	2,03	1,83	2,02
<b><math>\Sigma_x \Sigma_y</math></b>				<b>3,65</b>	<b>2,66</b>	<b>1,50</b>	<b>1,42</b>	<b>3,36</b>	<b>1,74</b>	<b>1,54</b>	<b>1,60</b>

$\alpha$  – declividade (°)

$\beta$  – direção das vertentes (°)

Todos esses resultados encontram-se dispostos nos mapas de fator de segurança tridimensional tanto para o evento de 05 de fevereiro de 2001 (Figura 82) quanto para o evento de 13-14 de outubro de 1995 (Figura 83).

A Tabela 31 apresenta o resumo dos resultados obtidos nas áreas estudadas para as quatro condições testadas.

Tabela 31 - Fator de segurança tridimensional das áreas de estudo.

Área	05 Fevereiro 2001				13-14 Outubro 1995			
	Coesão natural		Coesão mínima		Coesão natural		Coesão mínima	
	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo
<b>A</b>	2,43	1,70	0,86	0,83	1,79	1,26	0,91	0,88
<b>B</b>	2,48	2,30	1,19	1,09	2,03	1,70	1,25	1,15
<b>C</b>	2,38	1,90	0,94	0,89	1,77	1,41	1,01	0,94
<b>D</b>	1,77	1,27	0,79	0,75	1,28	1,20	0,84	0,75
<b>E</b>	3,10	2,34	1,31	1,20	1,72	1,50	1,45	1,28
<b>F</b>	2,89	2,37	1,50	1,42	2,52	1,90	1,59	1,50
<b>G</b>	1,84	1,86	1,05	1,01	1,75	1,50	1,11	1,09
<b>H</b>	3,65	2,66	1,50	1,42	3,36	1,74	1,54	1,60



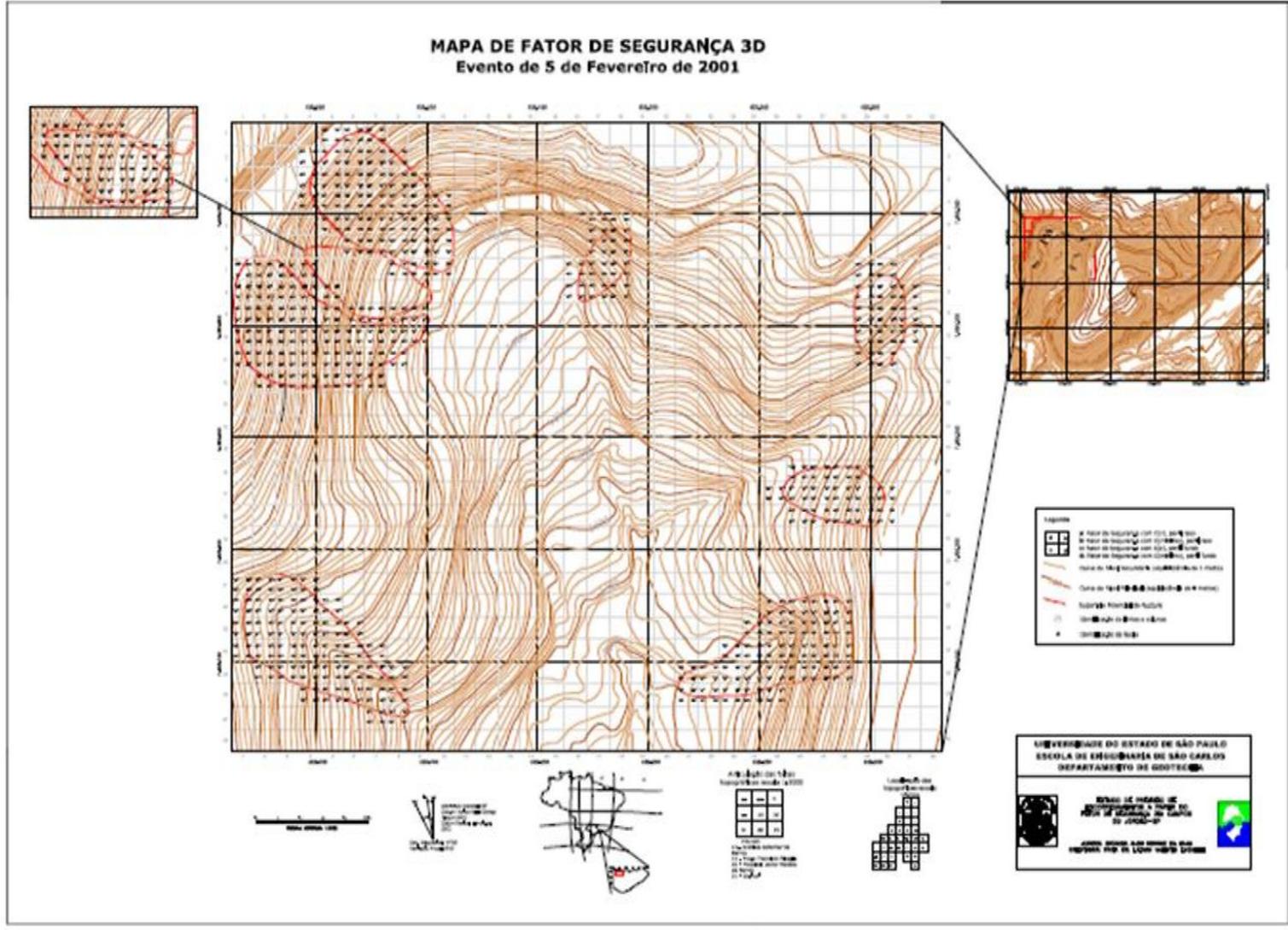


Figura 82 – Mapa de Fator de Segurança 3D para o evento de 5 de fevereiro de 2001.



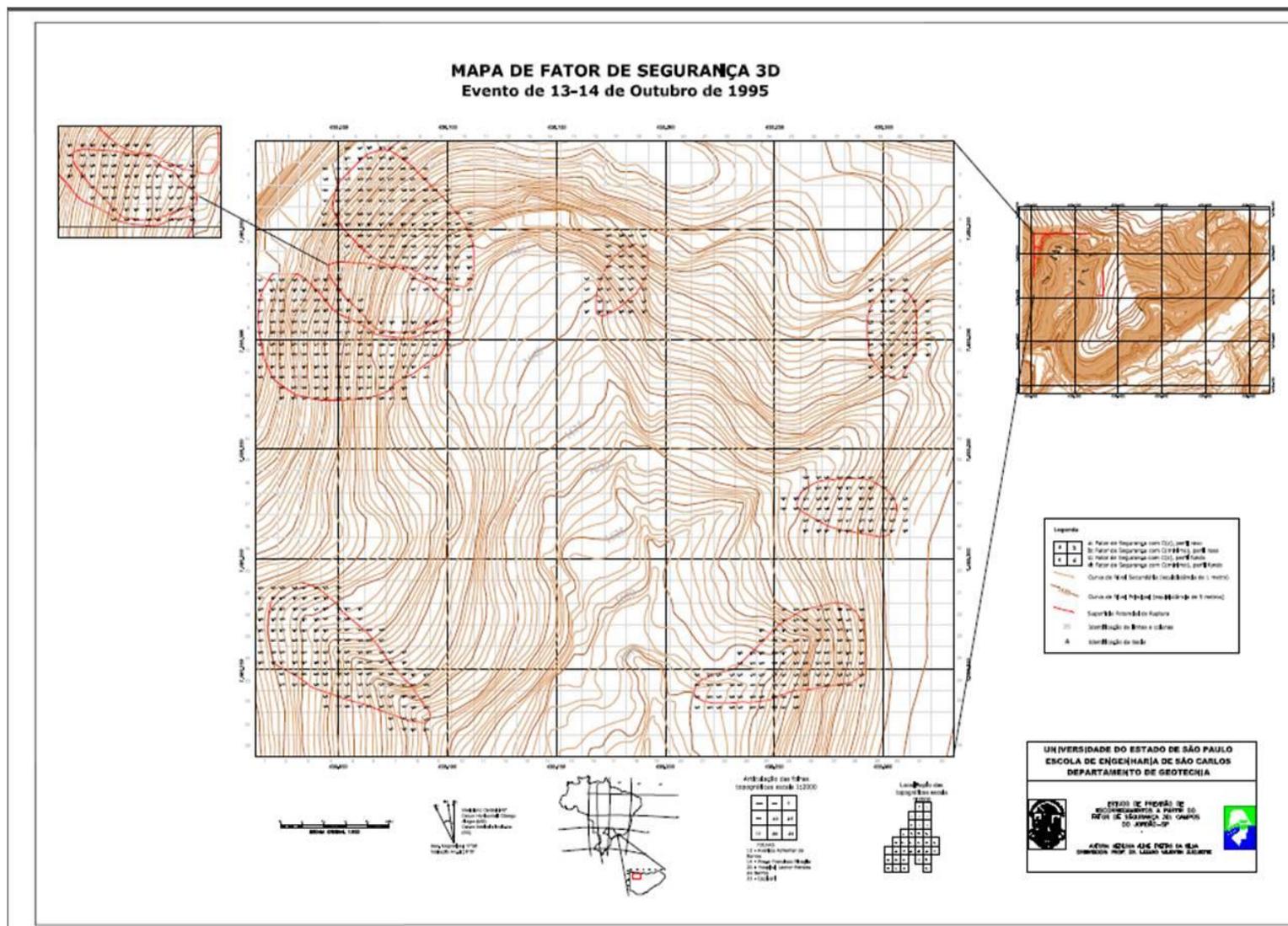


Figura 83 - Mapa de Fator de Segurança 3D para o evento de 13-14 de outubro de 1995.



## **6. ANÁLISES**

Diversas análises podem ser feitas sobre diferentes questões desta pesquisa, a seguir apresenta-se as análises mais importantes.

### **6.1 Quanto à Qualidade dos Dados Pré-existentes**

Como já foi elucidado ao longo do trabalho, diversos dados utilizados na pesquisa, tais como mapa topográfico, carta de materiais inconsolidados, dados de índices físicos, parâmetros de resistência, condutividade hidráulica saturada e espessura, foram extraídos de Ahrendt (2005).

Devido ao estudo ter se concentrado em subáreas da área de Ahrendt (2005) não houve dificuldades em relação à qualidade do mapa topográfico original. A escala de trabalho desta pesquisa é de 1:500, ou seja, todas as informações estão em nível de detalhe, e nem todo o mapa topográfico possui as curvas de níveis eqüidistantes de metro em metro. Esta característica é importante devido a outras informações, declividade e direção das vertentes, terem sido geradas com base no mapa topográfico.

Os dados sobre os materiais inconsolidados e a disposição destes materiais em perfis típicos foram essenciais para a aplicação da metodologia.

### **6.2 Quanto a Variabilidade dos Dados**

A discretização da área em grids regulares possibilitou a melhor avaliação da variabilidade dos dados geológicos, geotécnicos e hidrológicos utilizados no cálculo do fator de segurança 3D. Informações como declividade, direção das vertentes e materiais inconsolidados, peso específico, peso específico médio, coesão total e ângulo de atrito total de cada grid podem ser observados separadamente.

Da distribuição dos valores por grid é possível concluir que a variabilidade é significativa em termos dos valores dos resultados, o que pode ser observado no mapa com os fatores de segurança para cada grid.

### 6.3 Quanto aos Valores de FS3D a Partir da Média dos Parâmetros

Foi realizado um teste em uma das áreas (área D) onde se calculou o fator de segurança utilizando os valores médios de declividade, direção de vertente, coesão, ângulo de atrito, peso específico inicial e médio para área total. A Tabela 32 apresenta os valores de FS encontrados utilizando a metodologia, a média dos fatores de segurança obtidos para cada grid e os valores de FS utilizando a média dos parâmetros.

Tabela 32 – Análise da área D apresentando o resultado de três valores diferentes de FS para cada cenário.

Área D	05 Fevereiro 2001				13-14 Outubro 1995			
	Coesão natural		Coesão mínima		Coesão natural		Coesão mínima	
	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo	Mais superficial	Mais profundo
<b>1</b>	1,77	1,27	0,79	0,75	1,28	1,20	0,84	0,75
<b>2</b>	2,02	1,47	0,82	0,79	1,40	1,37	0,88	0,80
<b>3</b>	1,95	1,50	0,77	0,73	1,40	1,35	0,82	0,81

1 Fator de segurança 3D

2 Média dos fator de segurança dos grids

3 Fator de segurança utilizando os valores médios dos parâmetros

Esta análise é importante porque permite observa-se que os fatores de segurança utilizando a média dos parâmetros, principalmente considerando o cenário de coesão natural, são maiores que os resultados utilizando a metodologia proposta, porém vale destacar que são valores próximos de uma média simples dos FS encontrados para cada grid.

#### **6.4 Quanto a Delimitação das Áreas de Ruptura Potenciais**

A delimitação das áreas para o cálculo de  $FS_{3D}$  é uma etapa fundamental no trabalho, pois o tamanho, os aspectos geomórficos e ainda os materiais geológicos envolvidos são características que afetam diretamente o resultado final.

O método é mais eficaz quando a área delimitada é parte de uma encosta de extensão pequena. Pois quando se escolhe áreas extensas podem ocorrer dois tipos de problemas: a presença de vales dentro da área, o que implica na presença de grids com declividades muito baixas elevando o fator de segurança geral; e, a presença de grids com direção de mergulho (direção de vertente) muito diferente da direção de inclinação geral da encosta, outro fator que também contribui para o aumento do FS geral da área.

O melhor exemplo desta observação é a área D, pois dentre as oito áreas apresentadas é a que possui menor extensão ( $m^2$ ), tratando apenas de uma encosta. Todos os grids possuem direção SW não apresentando grande diferença com a direção principal de escorregamento, e por se tratar de uma encosta, não há vales, a declividade média é de  $36^\circ$  com mínimo de  $24^\circ$  e máximo de  $48^\circ$ .

### **6.5 Quanto as Superfícies de Ruptura Potenciais**

Optou-se neste estudo delimitar, através de critérios geotécnicos, as superfícies de ruptura potenciais ao invés de escolher profundidades aleatórias. As superfícies de ruptura escolhidas são as discontinuidades geotécnicas entre os diferentes tipos de materiais inconsolidados. Por este motivo, existiu a necessidade de calcular o FS-3D para duas superfícies distintas, uma mais superficial que representa o primeiro contato entre materiais inconsolidados (da superfície para o interior do maciço terroso) e outra mais profunda, entre a segunda e a terceira camadas de material geológico.

Através dos gráficos de umidade volumétrica e profundidade é possível observar que aonde ocorrem esses contatos, especialmente entre materiais com condutividade hidráulica saturada de diferentes ordens de grandeza, há um aumento da umidade volumétrica devido a esta barreira hídrica natural. Em função disso, ocorre a diminuição do parâmetro de coesão total, influenciando na deflagração do movimento gravitacional de massa.

### **6.6 Quanto a Relação $\theta$ x Profundidade**

Em relação à frente de umedecimento nos perfis de materiais inconsolidados após os eventos pluviográficos, obtidos pela simulação no programa HYDRUS-1D, a diferença de resultados encontrados foi bastante expressiva devido a diferença nos tipos de chuva selecionados, sendo um de curta duração e alta intensidade e outro de baixa intensidade e longa duração.

Para a chuva de 5 de fevereiro de 2001, após os 20 minutos de precipitação a saturação atingiu uma pequena profundidade (até 20 cm), porém poucos centímetros abaixo o perfil encontrava-se com sua umidade volumétrica inicial. Fato observável nos gráficos de infiltração acumulada e de fluxo *run-off* acumulado da unidade 6a (Figura 119 e Figura 185, respectivamente) onde pode-se observar que de toda a água precipitada (85 mm) grande parte escoou pela superfície (64,81 mm) e apenas uma pequena parcela (20,19 mm) infiltrou no material inconsolidado.

No caso do evento de chuva dos dias 13 e 14 de outubro de 1995, mesmo após 27 horas de chuva a superfície do perfil de materiais inconsolidados não chegou à condição de saturação, porém à medida que o perfil se aprofunda a umidade vai aumentando até chegar a saturação. Esta chuva se mostrou mais perigosa para a deflagração de escorregamentos que a anterior, pois em profundidades onde foram consideradas as superfícies de ruptura potenciais, que são os contatos entre diferentes materiais, como por exemplo, 20, 25, 40, 50 e 100 cm, o material geológico estava saturado, na Tabela 22, no capítulo anterior, estes dados são apresentados. Isto implica em valores de coesão muito baixos até mesmo zero e, conseqüentemente, o FS tende a ficar próximo ou abaixo de 1,0.

## **6.7 Quanto a Previsão Temporal**

Uma das questões a serem respondidas nesta pesquisa é referente a probabilidade de ocorrência dos eventos deflagradores considerados em determinados períodos de tempo.

O evento de 2001, de alta intensidade, como discutido, representa um evento único em toda a série histórica analisada. A probabilidade de ocorrer um evento com

características semelhantes em um ano é bem pequena (4%) e considerando um intervalo de tempo de 50 anos essa probabilidade chega próxima a 88%. O evento de 1995, por ser mais comum, em um ano tem quase 30% de probabilidade de ocorrer, e em 10 anos esse valor chega próximo a 100%.

### **6.8 Quanto ao Resultado do FS<sub>3D</sub>**

Na Tabela 31 têm-se os valores de fator de segurança 3D encontrado para cada área. A partir destes é possível constatar que as áreas H, F, E e B são as que apresentaram os maiores valores de FS e a área D a que apresentou os menores valores.

Os valores altos de FS para as referidas áreas são explicados devido à presença de grids com declividades muito baixas (elevando o FS da área como um todo) e a presença de determinados tipos de materiais inconsolidados que mesmo após os eventos chuvosos, para as superfícies de ruptura potenciais, não teve diminuição significativa na coesão total em função da umidade atingida.

A Tabela 33 apresenta os valores médios e de desvio padrão de declividade, direção das vertentes e dos FS de cada cenário, para cada área. Os valores de FS apresentados são a média aritmética dos FS dos grids que compõem a área.

Comparando os valores da Tabela 31 com os da Tabela 33, observa-se que todos os valores de FS foram majorados quando se calcula apenas a média simples dos valores encontrados nos grids. Esse aumento chegou a 49%, como por exemplo, para o FS<sub>3D</sub> da chuva de 2001, perfil profundo, da área E. Para a área F o aumento de todos os FS foram superiores a 30%

Tabela 33 – Média e desvio padrão dos valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e FS das áreas estudadas.

Área	Média/ Desvio Padrão	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	05 Fevereiro 2001				13-14 Outubro 1995			
				Coesão natural		Coesão mínima		Coesão natural		Coesão mínima	
				Raso	Fundo	Raso	Fundo	Raso	Fundo	Raso	Fundo
<b>A</b>	X	32,35	101,17	2,54	1,79	0,93	0,89	1,94	1,33	0,98	0,94
	DP	8,00	14,46	1,18	0,55	0,29	0,26	0,74	0,35	0,29	0,29
<b>B</b>	X	27,23	118,77	2,66	2,47	1,33	1,23	2,29	1,83	1,39	1,30
	DP	9,00	10,71	0,86	0,80	0,56	0,52	0,96	0,60	0,57	0,57
<b>C</b>	X	30,35	136,93	2,69	2,01	1,03	0,97	1,97	1,51	1,10	1,02
	DP	8,22	10,02	1,12	0,72	0,40	0,35	0,67	0,51	0,43	0,36
<b>D</b>	X	36,47	223,60	2,02	1,47	0,82	0,79	1,40	1,37	0,88	0,80
	DP	6,41	14,19	0,92	0,60	0,22	0,21	0,48	0,51	0,25	0,21
<b>E</b>	X	27,06	144,63	3,61	3,48	1,41	1,38	1,82	1,72	1,56	1,52
	DP	7,51	16,52	1,26	1,38	0,45	0,45	0,56	0,52	0,50	0,51
<b>F</b>	X	21,39	286,11	4,04	3,18	2,03	1,87	3,45	2,52	2,15	1,97
	DP	6,72	22,29	3,23	2,43	1,54	1,41	2,47	1,98	1,67	1,45
<b>G</b>	X	27,94	244,11	2,19	2,29	1,26	1,25	2,03	1,84	1,32	1,35
	DP	12,68	33,72	1,23	1,19	0,65	0,66	0,91	0,94	0,71	0,70
<b>H</b>	X	24,25	126,49	4,12	2,92	1,61	1,54	3,82	1,92	1,64	1,74
	DP	7,26	31,59	1,70	0,97	0,49	0,48	1,58	0,63	0,50	0,53

 $\alpha$  – declividade (°) $\beta$  – direção das vertentes (°)



## 7. CONCLUSÕES

A partir do desenvolvimento do presente trabalho, pode ser destacado as conclusões a seguir.

Os dados pré-existentes foram suficientes para a execução da metodologia proposta. O mapa topográfico original, mesmo em escala menor, não prejudicou a elaboração das cartas de declividade e de direção das vertentes. Os dados geológicos, geotécnicos e hidráulicos sobre cada material inconsolidado, assim como, as informações sobre perfis típicos existentes na área, a distribuição destes e a espessura dos materiais inconsolidados foram essenciais em diversas etapas do trabalho.

Quanto a utilização do programa HYDRUS-1D, a versão utilizada apresenta algumas limitações técnicas, tais como a ausência de comunicação entre outros programas como o Microsoft Excel, isto dificultava a fluência em determinadas etapas do trabalho. O programa apresenta alguns *bugs*, o que é identificado por vezes nos dados de saída (os gráficos), mas não afeta as tabelas. Ou seja, os gráficos apresentam defeitos (distorções), mas as tabelas estão com os dados corretos.

Em relação aos dados gerados pelo programa, estes foram compatíveis com o esperado, pois duas chuvas de características distintas foram simuladas e os dados de saída foram compatíveis com os modelos teóricos. Como a chuva de 2001 foi de intensidade muito alta era de se esperar que grande parte desta água escoaria pela superfície, e o evento de 1995 apresenta valores baixos de quantidade de água ao longo do tempo, portanto, toda ou quase toda a água precipitada tinha condições de infiltrar no perfil de materiais inconsolidados.

O objetivo da utilização de um modelo que simule o processo de infiltração foi obter os valores de umidade volumétrica após os eventos chuvosos, e o programa HYDRUS, mesmo em sua versão unidimensional, atendeu ao objetivo proposto. A utilização de programas mais avançados bidimensionais ou tridimensionais podem refinar ainda mais esta etapa da metodologia, fica-se assim uma sugestão para futuras atualizações e aperfeiçoamentos dos procedimentos.

Os resultados de FS-3D encontrados foram compatíveis com as condições geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas considerados durante a modelagem. Nas áreas mais localizadas, tratando apenas de parte de uma encosta, com pequena variação em relação às direções das vertentes, e não apresentando vales, ou seja, ausência de grids com baixa declividade, os valores de  $FS_{3D}$  foram baixos e para a condição de coesão mínima os valores ficaram abaixo de 1,0. As áreas que não apresentam estas características obtiveram valores mais altos de  $FS_{3D}$  mostrando a importância da homogeneidade geomórfica da área considerada.

O cálculo do FS-3D utilizando valor baixo de coesão total ( $0,1 \text{ kN/m}^2$ ) permitiu constatar a influência do parâmetro de coesão na análise de estabilidade de taludes. Porém, observa-se que apesar de sua grande influência este parâmetro, sozinho, não é responsável pela deflagração do processo de movimento gravitacional de massa, pois houve casos em que ainda assim o  $FS_{3D}$  não chegou nem próximo de 1,0. Isto se justifica em áreas que possuem grids com declividade baixa e/ou desvio padrão alto em relação à direção de mergulho das vertentes.

Uma última consideração sobre o trabalho é referente à viabilidade do grupo de procedimentos que apesar de constituir-se de diversos métodos e princípios é viável em termos de usá-lo a partir de informações geradas por mapeamentos geotécnicos em escalas maiores que 1:10.000. Existem alguns pontos que podem

ser aperfeiçoados como a automatização de algumas etapas e a utilização de programas mais avançados de modelos de infiltração. Estas questões merecem ser estudadas e avaliadas e se, se mostrarem vantajosas o método ser modificado.

Nesse estudo ficou claro que a metodologia apresentou características já observadas por outros pesquisadores que a utilização de valores médios prejudica a análise de estabilidade de taludes, enquanto as análises em 3D permitem obter valores mais concordantes com as condições geológico-geotécnica-hídrica de cada área.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENDT, A. Movimentos de massa gravitacionais – Proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP. São Carlos. 360 f. **Tese (Doutorado)**. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2005.

ALEOTTI, P., CHOWDHURY, R. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment** 58, 21-44. 1999.

ALEOTTI, P. A warning system for rainfall-induced shallow failures. **Engineering Geology**, 73, 247-265. 2004.

AL-HOMOUD, A.S., PRIOR, G., AWAD, A. Modelling the effect of rainfall on instabilities of slopes along highways. **Environmental Geology**, 37 (4), 317-325, 1999.

AMADESI, E., VIANELLO, G. Nuova guida alla realizzazione di una carta di stabilità dei versanti. **Memorie Società Geologica Italiana**, 19, 53-60. 1978.

ALMEIDA, F.F.M. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. **International Symposium on Continental Margins of Atlantal Type**, Anais, Academia Brasileira de Ciências, 48, 15-26. 1976.

ALONSO, E.; GENS, A.; LLORET, A.; DELAHAYE, C. Effect of rain infiltration on the stability of slopes. In: ALONSO & DELAGE, ed. **Unsaturated Soils**. p. 241–249. 1995.

AMARAL JR., A.F. Mapeamento geotécnico aplicado a análise de processos de movimentos de massa gravitacionais: Costa Verde - RJ - escala 1:10.000. São Carlos. 190 f. **Dissertação (Mestrado)**. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 2007.

ANAGNOSTI, P. Three-dimensional stability of fill dams. Proceedings, **7<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 1969.

ARAÚJO FILHO, J.C., RIBEIRO, M.R. Infiltração da água em cambissolos do baixo de Irecê (BA). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 20, 363-370. 1996.

AVILA, D., ROJAS, J.C., SALINAS, L.M. Effect of rainfall on the stability of a slope. In: **2nd Asian Conference on Unsaturated Soils, Geotechnical and Geoenvironmental Issues**, Osaka, Japan, 475-480. 2003.

AYALEW, L., YAMAGISHI, H. Slope movements in the Blue Nile basin, as seen from landscape evolution perspective. **Geomorphology**, 57:97–116. 2004.

AYELEW, L., YAMAGISHI, H., UGAWA, N. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case. In **Tsgawa area of Agano River, Niigata Prefecture**, Japan. *Landslides* 1, 73-81. 2004.

BACCHI, O.S., REICHARDT, K. Reescalonamento de propriedades hídricas na avaliação de métodos de determinação da condutividade hidráulica de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 12, 217-223. 1988.

BAEZA, C., COROMINAS, J. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of statistical techniques. **Proceedings of VII International Symposium on Landslides**, Trondheim, 1, 147-152. 1996.

BAEZA, C., COROMINAS, J. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. **Earth Surface Processes and Landforms**, 26, 1251-1263. 2001.

BAI, S.B.; WANG, J., LU, G.N., KANEVSKI, M., POZDNOUKHOV, A. GIS-based landslide susceptibility mapping with comparisons of results from machine learning methods process versus logistic regression in Bailongjiang river basin, China. **Geophysical Research**. Abstracts, 10. 2008.

BAKER, R., LESHCHINSKI, D. Stability analysis of conical heaps. **Soils and Foundation**, Tokyo, 27(4), 99-110. 1987.

BALIGH, M.M., AZZOUZ, A.S. End effects on stability of cohesive slopes. **Journal of Geotechnical Engineering Division**. ASCE, 101(11), 1105-1117. 1975.

BALDELLI, P.; ALEOTTI, P.; POLLONI, G. Landslide-susceptibility numerical mapping at the Messina Straits crossing site, Italy. In: **Landslides**, Balkema, Rotterdam, 153-158. 1996.

BASILE, A., MELE, G. TERRIBILE, F. Soil hydraulic behavior of a selected benchmark soil involved in the landslide of Sarno 1998. **Geoderma**, 117 (3-4), 331-346. 2003.

BAUM, R.L., REID, M.E. Geology, hydrology and mechanics of a slow-moving, clay-rich landslide, Honolulu, Hawaii. In: Haneberg, W.C., Anderson, S.A. (eds) Clay and shale slope instability. **Geological Society of America**, Boulder, Colorado, 79-105. 1995.

BELL, R., GLADE, T. Quantitative risk analysis for landslides – Examples from BÍldudalur, NW-Iceland. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 4, 117-131. 2004

BERNKOPF, R.L., CAMPBELL, R.H., BROOKSHIRE, D.S., SHAPIRO, C.D. A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation. **Bulletin of the Association of Engineering Geologists**, Vol. XXV, n. 1, 39-56. 1988

BEVEN, K. J., KIRKBY, M. J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, 24(1), 43-69. 1979.

BISHOP, A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Proceedings. **European Conference Stability Earth Slopes, Stockholm, 1, 1-13, and Geotechnique**, 1(7). 1954.

BONUCCELLI, T.J. Estudo dos movimentos gravitacionais de massa e processos erosivos com aplicação na área urbana de Ouro Preto (MG)-escala 1:10000. **Tese (Doutorado)**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo. 497 p. 1999.

BOSI, C., DRAMIS, F., GENTILI, B., Carte geomorfologiche di dettaglio ad indirizzo applicativo e carte di stabilità a base geomorfologica. **Geologia Applicata ed Idrogeologia**, Bari, 20(2), 53-62. 1985.

BOUWER, H. Infiltration of water into nonuniform soil. **Journal of Irrigation and Drainage Division**. ASCE, 95, 451-462. 1969.

BRAKENSIEK, D.L., ONSTAD, C.A. Parameter estimation of the Green and Ampt infiltration equation. **Water Resources Research**, 13, 1009-1012. 1977.

BRAND, E.W. Analysis and design in residual soils. In: ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference - **Engineering and construction in tropical and residual soil**, Honolulu, Proceedings, 11-15. 1982.

BRAND, E.W. Landslide risk assessment in Hong Kong. In: **International Symposium on Landslide**, 5, Lausanne. Resumes, Rotterdam, Balkema, 1059-1073. 1988.

BRAND, E.W. Geotechnical engineering in tropical residual soils. First International Conference on Geomechanics. In: **Tropical Lateritic and Saprolitic Soils**. Brasília, Proceedings, 3, 23-91. 1985.

BRANDÃO, V.S., PRUSKI, F.F., SILVA, D.D. **Infiltração da Água no Solo**. Editora UFV, Viçosa, 98p. 2003.

BROOKS, R.H., COREY, A.T. Properties of porous media affecting fluid flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE Prod. 72(IR2), 61-88. 1964.

CAI, M., XIE, M., LI, C. Gis-based 3D limit equilibrium analysis for design optimization of a 600 m high slope in an open pit mine. **Journal of University of Science and Technology**. Beijing, 14(1), 1-5. 2007.

CAPOLONGO, D., REFICE, A., MANKELOW, J. Evaluating earthquake-triggered landslide hazard at the basin scale through GIS in the Upper Sele River valley. **Surveys in Geophysics**, 23, 595–625. 2002.

CARRARA, A. Multivariate models for landslide hazard evaluation, **Mathematical Geology** 15(3), 403–426. 1983

CARRARA, A. Landslide Hazard Mapping: Aims and Methods. **Mouvements de Terrains**. Association Française de Géographie Physique, Colloque de CAEN, pp.141-151. 1984.

CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V., REICHENBACH, P. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. **Earth Surfaces Processes and Landforms**, 16, p.427-445. 1991.

CARRARA, A., CARDINALI, M., GUZZETTI, F., REICHENBACH, P. GIS Technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), **Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards**. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135-175, 1995.

CARRARA, A., MERENDA, L. Landslide inventory in Northern Calabria, Southern Italy. **Bulletin Geological Society of America**. 87 8, p. 1153–1162. 1976.

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

CAVAUNIDES, S. On the ratio of factors of safety in slope stability analysis. **Géotechnique**, 37(2), p. 207-210. 1987.

CARSON, M. A., KIRKBY, M. J. Hillslope Form and Process. **Cambridge University Press**, 416p. 1972.

CHAMPATI RAY, P.K., DIMRI, S., LAKHERA, R.C., SATI, S. Fuzzy-based method for landslide hazard assessment in active seismic zone of Himalaya. **Landslides**, 4, 101-111. 2007.

CHANG, M. A. 3D slope stability analysis method assuming parallel lines of intersection and differential straining of block contacts. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, 39(4), 799-811. 2002.

CHAU, K.T., SZE, Y.L., FUNG, M.K., WONG, W.Y., FONG, E.L., CHAN, L.C.P. Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. **Computers & Geosciences**, 30, 429-443. 2004.

CHEN, R.H., CHAMEAU, J.L. Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes. **Geotechnique**, London, 32(1), 31-40. 1982.

CHEN, Z., MI, H., ZHANG, F., WANG, X. A simplified method for 3D slope stability analysis. **Canadian Geotechnical**, 40, 675-683. 2003.

CHILDS, E.C., BYBORDY, M. The vertical movement of water in a stratified porous material. **Water Resources Research**, 5:446–459. 1969.

CHING, R.K.H., SWEENEY, D.J., FREDLUND, D.G. Increase in factor of safety due to soil suction for two Hong Kong slopes. In: **International Symposium on Landslides**, 4, Toronto, Proceedings, 1, 17-59. 1984.

CHO, S. E., LEE, S. R. Evaluation of Surficial Stability for Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. 756-763. 2002.

CHOWDHURY, R., FLENTJE, P. Uncertainties in rainfall-induced landslide hazard. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 35, 61-70. 2002.

CHOWDHURY, R. Aspects of risk assessment for landslides. In: **Landslides**, Senneset (ed.), Balkema, Rotterdam, 183-188. 1996

CHOWDHURY, R., FLENTJE, P. Role of slope reliability analysis in landslide risk management. **Bulletin of Engineering Geology**, 62, 41-46. 2003.

CHU, S.T. Infiltration during an unsteady rain. **Water Resources Research**, 14 (3), 461-466. 1978.

CHUGH, A.K. Variable factor of safety in slope stability analysis. **Geotechnique**, 1, 57-64. 1984.

CHUNG, C.F., FABBRI, A.G., Multivariate regression analysis for landslide zonation. In: Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), **Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards**. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 107-142. 1995.

CHUNG, C.F., FABBRI, A.G. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 65 (12), 1389-1399. 1999.

CLERICE, A., PEREGO, S., TELLINI, C., VESCOVI, P. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. **Geomorphology**, 48, 349-364, 2002

CLERICE, A., PEREGO, S., TELLINI, C., VESCOVI, P. A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the Conditional Analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines). **Environmental Geology**, 50, 941-961. 2006

COLLINS, B.D., ZNIDARCIC, D. Stability analysis of rainfall induced landslides. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 130 (4), 362-372. 2004.

CROSTA, G. Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. **Environmental Geology**, v.35, p. 131-145. 1997.

CROZIER, M.J. Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of antecedent water status model. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 24, p. 825-833. 1999.

CROZIER, M.J., GLADE, T. Frequency and magnitude of landsliding: fundamental research issues. In **Proceedings of International Conference on Geomorphology**, Bologna (M. Crozier & R. Mausbacher, eds.), Gebruder Borntraeger, Berlin. II, 141-155. 1999.

CRUDEN, D. M., VARNES, D. J.: Landslide Types and Processes, In: **Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board**, edited by: Turner, A. K. and Schuster, R. L., Special Report 247, National Research Council, National Academy Press, Washington D. C., 36–75. 1996.

DAI, F.C., LEE, C.F. A spatiotemporal probabilistic modeling of storm-induced shallow landsliding using aerial photographs and logistic regression. **Earth Surface Processes and Landforms** 28, 527-545. 2003.

DAI, F.C., LEE, C.F., NGAI, Y.Y. Landslide risk assessment and management: an overview. **Engineering Geology**, 64, 65-87. 2002

DAI, F.C., LEE, C.F. Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study. **Canadian Geotechnical Journal** 38, 911-923. 2001.

DAVIS, J.C., CHUNG, C., OHLMACHER, G.C. Two models for evaluating landslide hazards. **Computers & Geosciences**, 32, 1120-1127, 2006.

DE MELLO, V.F.B. Statistics, reliability, theory and safety factors. In: European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Design Parameters In: **Geotechnical Engineering**, 7, 4, 112-113. 1979.

DEL GAUDIO, V., WASOWSKI, J. Time probabilistic evaluation of seismically induced landslide hazard in Iripinia (Southern Italy). **Soil Dyn Earthquake Engineering**, 24(12), 915–928. 2004.

DIETRICH, W.E.; REISS, R.; HSU, M-L.; MONTGOMERY, D.R. A process based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. **Hydrological Processes**, 9, p. 383-400. 1995.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. **NCASI** (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), Technical Report, 29 p. 1998.

DIETRICH, W. E., WILSON, C. J., MONTGOMERY, D. R., MCKEAN, J. Analysis of Erosion Thresholds, Channel Networks and Landscape Morphology Using a Digital Terrain Model. **The Journal of Geology**, v. 10, p. 259-278. 1993.

DUMAN, T.Y., CAN, T., GOKCEOGLU, C., NEFESLIOGLU, H.A. Landslide susceptibility mapping of Cekmece area (Istanbul, Turkey) by conditional probability. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, 2, 155-208. 2005.

DUNCAN, J.M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE 122 (7), 577–596. 1996.

DUNNE, T., ZHANG, W., AUBRY, B.F. Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff . **Water Resources Research**, 27(9), p. 2271-2285. 1991.

DYKES, A.P. Weathering-limited rainfall-triggered shallow mass movements in undisturbed steep land tropical rainforest. **Geomorphology**, 46, p., 73-93. 2002.

EAGLESON, P.S. A simplified model of soil moisture movement into the liquid phase. **Water Resources Research**, 14(5), p. 722-730. 1978.

EINSTEIN, H.H. Landslide risk - Systematic approaches to assessment and management. In: Cruden, D.; FEEL, R. (eds.) **Landslide Risk Assessment**. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment. Honolulu. A.A. Balkema. Rotterdam, 25-50. 1997.

EINSTEIN, H.H. Special lecture: landslide risk assessment procedure. Proc. 5th International. **Symposium on Landslides 2**, pp. 1075–1090 Lausanne . 1988.

ENOKI, M.; KOKUBU, A. A.; IKEDA, Y. Infiltration of rainwater and slope failure. In: GRIFFITHS, STOKES & THOMAS eds. **Landslides**. Balkema, Rotterdam. p. 27-35. 1999.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Estimation of infiltration rate in the vadoze zone: compilation of simple mathematical models. In: **Ravi, V., Williams J.R. (eds.)**, v.1, 84p. 1998.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY Estimation of infiltration rate in the vadoze zone: application of selected mathematical models. In: **Williams, J.R., Ouyang, Y., Chen, J., Ravi, V. (eds.)**, v.2, 117p. 1998.

ERCANOGLU, M., GOKCEOGLU, C., VAN ASCH, TH.W.J. Landslide susceptibility zoning north of Yenice (NW Turkey) by multivariate statistical techniques. **Natural Hazards** 32, 1-23, 2004.

ESAKI, T., XIE, M., ZHOU, G., MITANI, Y. Slope unit based 3D landslide hazard mapping system. **ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics**, South African Institute of Mining and Metallurgy. 2003.

ESPINOZA, R.D., REPETTO, P.C., MUHUNTHAN, B. General framework for stability analysis of slopes. **Geotechnique**, 42, 603-615. 1992.

EVANS, S.G. Characterizing landslide risk in Canada. Proc. **3<sup>rd</sup> Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards**. Edmonton, Canada, 19-34. 2003.

FELL, R., HARTFORD, D. Landslide risk management. In: Cruden, D.; FEEL, R. (eds.) Landslide Risk Assessment. **Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment**. Honolulu. A.A. Balkema. Rotterdam, 51-109. 1997.

FELL, R. Landslide risk assessment and acceptable risk. **Canadian Geotechnical Journal**, 31, 261-272. 1994.

FENG, S.R., FENG, D.X., GE, X.R., GU, X.R. 3D limit equilibrium method for slope stability and its application. Chin. J. **Geotechnical Engineering**. 21(6), 657-661. 1999.

FERNANDES, N. F., GUIMARÃES, R. F., Gomes, R. A. T., Vieira, B. C., MONTGOMERY, D. R. & GREMMNBERG, H. M. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos na Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelos de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n 1, p. 51-71. 2001.

FERNANDES, N.F., GUIMARÃES, R.F., GOMES, R.A.T., VIEIRA, B.C., MONTGOMERY, D.R., GREENBERG, H. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. **Catena**, 55, 163-181. 2004.

FERNÁNDEZ, T., IRIGARAY, C., EL HAMDOUNI, R., CHACÓN, J. Methodology for Landslide Susceptibility Mapping by Means of a GIS. Application to the Contraviesa Area (Granada, Spain). **Natural Hazards** 30, 297-308. 2003.

FLERCHINGER, G.N., WALTTS, F.J., BLOOMSBURG, G.L. Explicit solution to Green-Ampt equation for nonuniform soils. **Journal of Irrigation and Drainage Division**. ASCE, 90, 114, 561-565. 1988.

FOK, Y.-S. One-dimensional infiltration into layered soils. **Journal of Irrigation and Drainage Division**. ASCE, 107, 121-129. 1970.

FOURIE, A.B.; ROWE, D.; BLIGHT, G.E. The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump. **Geotechnique**, v.49, n.1, p.1-13. 1999.

FRANGOV, G., IVANOV, P., DOBREV, N. Hazard evaluation of origin and activation of deep landslides in Bulgaria. In: Senneset (ed.), **Landslides**, Balkema, Rotterdam, 1903-1908.1996.

FRATTINI, P., CROSTA, G., CARRARA, A., AGLIARDI, F. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. **Geomorphology**. 94, 419-437, 2008.

FREDLUND, D.G. Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, 16, 121-139. 1978.

FREDLUND, D.G., VANAPALLI, S.K., XING, A., PUFAHL, D.E. Predicting the shear strength function for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve. **Unsaturated Soils**, 63-69. 1995.

FREYBERG, D.L., REEDER, J.W., FRANZINI, J.B., REMSON, I. Application of the Green-Ampt model to infiltration under time-dependent surface water depths. **Water Resources Research**, 16 (3), 517-528. 1980.

GASMO, J.M.; RAHARDJO, H.; LEONG, E.C. Infiltration effects on stability of a residual soil slope. **Computers and Geotechnics**, 26, p.145-165. 2000.

GENS, A., HUTCHINSON, J.N., CAVOUNIDIS, S. Three-dimensional analysis of slices in cohesive soils. **Geotechnique**, 38(1), 1-23. 1988.

GIRAUD, R.E.; SHAW, L.M. Landslide Susceptibility Map of Utah. **Utah Geological Survey**, Map 228DM, 16p. 2007

GODEFROY, P., HUMBERT, M. La cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain et aux séismes. **Hydrogéologie – Géologie de l'Ingénieur**, 2, 69-90. 1983.

GOMEZ, H., KAVZOGLU, T. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. **Engineering Geology**, 78, 11-27. 2005.

GORSEVSKI, P.V., GESSLER, P.E., JANKOWSKI, P. Integrating a fuzzy k-means classification and a Bayesian approach for spatial prediction of landslide hazard. **Journal of Geographical Systems**, 5, 223-251. 2003.

GASMO, J.M.; RAHARDJO, H.; LEONG, E.C. Infiltration effects on stability of a residual soil slope. **Computers and Geotechnics**, 26, p.145-165. 2000.

GREEN, W.H., AMPT, G.A. Studies on soil physics: I flow of air and water through soils. **The Journal of Agricultural Science**. (Cambridge) 4, 1-24, 1911.

GUIDICINI, G., NIEBLE, C.M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. Editora Edgard Blücher, São Paulo. 1983.

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

GUIMARÃES, R.F., MONTGOMERY, D.R., GREENBERG, H.M., FERNANDES, N.F., GOMES, R.A.T., de CARVALHO, O.A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, 69, (1-2), 99-108. 2003.

GUZZETTI, F., CARRARA, A., REICHENBACH, P., CARDINALI, M. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology** 31, 181-216, 1999.

GUZZETTI, F. Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. **Engineering Geology**, 58, 89-107. 2000.

GUZZETTI, F., REICHENBACH, P., GHIGI, S. Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera Valley, Central Italy. **Environmental Management** 34, n.2, 191-208. 2004.

GUZZETTI, F., REICHENBACH, P., CARDINALI, M., GALLI, M., ARDIZZONE, F. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. **Geomorphology**, 72, 272-299. 2005.

HACHUM, A.Y., ALFARO, J.F. Rain infiltration into layered soils: prediction. **Journal of Irrigation and Drainage Division**. ASCE, 106 (4), 311-319. 1980.

HAMMOND, C., HALL, D., MILLER, S., SWETIK, P. Level I stability analysis (LISA) Documentation for version 2.0. In: **General Technical Report INT-285** - United States Department of Agriculture/Forest Service. Intermountain research station, Ogden, UT, 190p. 1992.

HANSEN, A. Landslide hazard analysis. In: D. Brunnsden and D.B. Prior, Editors. **Slope instability**, John Wiley and Sons, New York, p. 523–602. 1984.

HANSEN, A., FRANKS, C.A.M., KIRK, P.A., BRIMICOMBE, A.J., TUNG, F. Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong. In: Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), **Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards**. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135-175. 1995.

HARTLEN, J., VIBERG, L. General report: evaluation of landslide hazard. **Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides**. Balkema Publishers, A.A., Lausanne, 1037-1057. 1988

HAVENITH, H-B, STROM, A., CACERES, F., PIRARD, E. Analysis of landslide susceptibility in the Suusamy region, Tien Shan: statistical and geotechnical approach. **Landslides** 3, 39-50. 2006.

HE, Y., BEIGHLEY, R.E. GIS-based regional landslide susceptibility mapping: a case study in southern California. **Earth Surface Process and Landforms** 33, 380-393. 2008.

HEGG, C., KIENHOLZ, H. Determining paths of gravity-driven slope processes the "vector tree model". In: Carrara, A., Guzzetti, F. **Geographic Information System in Assessing Natural Hazards**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 79-92. 1995.

HILLEL, D., GARDNER, W.R. Measurement of unsaturated conductivity diffusivity by infiltration through an impeding layer. **Soil Science**, 43, 109-149. 1970.

HILLEL, D. Internal drainage and redistribution following infiltration. In: HILLEL, D. (ed.), **Applications of soil physics**. New York, Academic, 50-72. 1980

HIRUMA, S., RICCOMINI, C., MODENESI-GAUTTIERI, M.C. Neotectônica no planalto de Campos do Jordão, SP. **Revista Brasileira de Geociências**, 31(3), 375-384. 2001.

HIRUMA, S.T. Neotectônica no planalto de Campos do Jordão, SP. **Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo**, São Paulo, SP. 106p. 1999.

HO, K., LEROI, E. ROBERTS, B. Keynote lecture: quantitative risk assessment – application, myths and future direction. **Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GEOENG 2000**, Melbourne, Australia, vol. 1. Technomic, Lancaster, pp. 236-312. 2000.

HO, D.Y.F., FREDLUND, D.G. Increase in strength due to suction for two Hong Kong soils. In: **Geotechnical Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils** (ASCE), Honolulu, Hawaii, Proceedings, 263-295. 1982.

HOLLINGSWORTH, R., KOVACS, G.S., Soil slumps and debris flows: prediction and protection. **Bulletin American Association of Engineering Geologists**, 18(1), 17-28. 1981.

HOLTAN, H.N. A concept for infiltration estimates in watershed engineering. Agricultural Research Service US Department of Agriculture, p. 41-51. 1961.

HOPFINGER, E.J. Snow avalanche motion and related phenomena. **Annual Review of Fluid Mechanics.**, 15, 47-76. 1983.

HORTON, R.E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Science Society of America Journal*, v.5, 399-417. 1940.

HOVLAND, H.J. Three-dimensional slope stability analysis method. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, GT9, 971-986, 1977.

HUANG, C.C., TSAI, C.C. New method for 3D and asymmetrical slope stability analysis. **Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering Division**, ASCE, 126(10), 917-927. 2000.

HUMBERT, M. La cartographie en France des Zones Exposees a des Risques lies aus Mouvements du Sol – Cartes Zermos / Risk-Mapping of areas exposed to movements of soil and subsoil – French “Zermos” Maps. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 16 (1), 80-82. 1977.

HUNGR, O. Some methods of landslide hazard intensity mapping. In: **Proceedings of the Landslide Risk Workshop**. Edited by R. Fell and D.M. Cruden. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. pp. 215–226. 1997.

HUNGR, O. Dynamics of rock avalanches and other types of slope movements. **PhD Thesis**, University of Alberta, Edmonton, Canada. 1981.

HUNGR, O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions. **Geotechnique**, London, 37(1), 113-117. 1987.

HUNGR, O., SALGADO, F.M., BYRNE, P.M. Evaluation of a three-dimensional method of slope stability analysis. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, 30, 905-919. 1989.

HUNT, R.E. **Geotechnical engineering techniques and practices**. USA, McGraw-Hill, 729p. 1986.

HUTCHINSON. J. N. General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, In: **Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides**, edited by: Bonnard, C., Balkema, Rotterdam, 3–35, 1988.

IBSEN, M., BRUNSDEN, D. The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the south coast of Britain, Ventnor, Isle of Wight. **Geomorphology**, 15, 241-258. 1996

INFANTI JR, N.; FORNASSARI FILHO, N. Processos de dinâmica superficial. Livro: **Geologia de Engenharia**, ABGE, cap. 9, 131-152 p. 1998.

IRIGARAY, C., FERNÁNDEZ T., HAMDOUNI R.EL., CHACÓN, J. Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain). **Natural Hazards**, 41, 61-79, 2007.

IVERSON, R.M. Landslide triggering by rain infiltration. **Water Resources Research** 36 (7), 1897-1910. 2000.

IVERSON, R.M. Groundwater flow fields in infinite slopes. **Geotechnique**. v. 40, n.1, p. 139-143. 1990.

JAMES, L.G., LARSON, C.L. Modeling infiltration and redistribution of soil water during intermittent application. **Transactions of ASAE**, 19 (13), 482-488. 1976.

JIBSON, R.W., HARP, E.L., MICHAEL, J.A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: An example from the Los Angeles California area. **US Geological Survey**, Open-File Rep., 98-113. 1998.

JIBSON, R.W., HARP, E.L., MICHAEL, J.A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. **Engineering Geology**, 58, 271-289. 2000.

JOHNSON, K.A., SITAR, N. Hydraulic conditions leading to debris flow initiations. **Canadian Geotechnical Journal**, v.27, p. 789-801. 1990.

KANUNGO, D.P., ARORA, M.K., GUPTA, R.P., SARKAR, S. Landslide risk assessment using concepts of danger pixels and fuzzy set theory in Darjeeling Himalayas. **Landslides**, 5, 407-416. 2008

KHAWLIE, M.R. Hazard mapping: The Abou A'li river flood, Tripoli-Lebanon. **7<sup>th</sup> International IAEG Congress**. Balkema, Rotterdam, 2049-2057. 1994.

KIENHOLZ, H. Kombinierte geomorphologische Gefahrenkarte 1:10.000 von Grindelwald. Geographica Bernensia G4., **Geographisches Institut Universität**, Bern, Switzerland. 1977.

KIENHOLZ, H., HAFNER, H., SCHNEIDER, G., TAMRAKAR, R. Mountain hazards mapping in Nepal's Middle Mountains. Maps of land use and geomorphic damages (Kathmandu-Kakani area). **Mountain Research and Development**, 3(3), 195-220. 1983.

KIENHOLZ, H., SCHNEIDER, G., BICHSEL, M., GRUNDER, M., MOOL, P. Mapping of mountain hazards and slope stability. **Mountain Research and Development**, 4, 247-266. 1984.

KIM, J., JEONG, S., PARK, S., SHARMA, J. Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. **Engineering Geology** 75, 251-262, 2004.

KOMAC, M. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. **Geomorphology**, 74 (1-4), 17-28. 2006.

KOSTIAKOV, A.N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. In: **Trans. Comm. International Society of Soil Science**, 6, Moscow, Part A, 17-21. 1932.

LACASSE, S., NADIM, F. Uncertainties in characterizing soil properties. Uncertainty in the geological environment, **Geotechnical Special Publication - ASCE**, n. 58. 1996.

LACERDA, W.A. Fatigue of residual soils due to cyclic pore pressure variation. In: **International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 12, Rio de Janeiro, Proceedings, v. 5, p. 3085-3087. 1989.

LAM, L., FREDLUND, D.G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis. **Canadian Geotechnical Journal** 30, 905-919. 1993.

LAN, H.X., LEE, C.F., ZHOU, C.H., MARTIN, C.D. Dynamic characteristics analysis of shallow landslides in response to rainfall event using GIS. **Environmental Geology**, 47, 254-267. 2005.

LEE, S. Application of likelihood ratio and logistic regression models to landslide susceptibility mapping using GIS. **Environmental Management** 34 (2), 223-232, 2004.

LEE, S., MIN, K. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. **Environmental Geology**, 40, 1095-1113. 2001.

LEE, S., PRADHAN, B. Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia. **Journal of Earth System Science**. 115, n. 6, 661-672. 2006

LEE, S., RYU, J-H., WON, J-S., PARK, H-J. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. **Engineering Geology** 71, 289-302, 2004.

LEE, S., CHWAE, U., MIN, K. Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure: the Janghung area, Korea. **Geomorphology**, 46, 149-162. 2002.

LEROI, E. Landslide risk mapping; Problems, limitations and developments. In: Cruden, D.; FEEL, R. (eds.) **Landslide Risk Assessment. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment**. Honolulu. A.A. Balkema. Rotterdam, 239-250. 1997.

LEROUEIL, S., LOCAT, J., VAUNAT, J., PICARELLI, L., LEE, H., FAURE, R. Geotechnical characterization of slope movements. Proc. **7<sup>th</sup> International Symposium on Landslides**. Trondheim, 1, 53-74. 1996.

LEROUEIL, S., Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms. **Geotechnique**, 51, (3), 197-243. 2001.

LESHCHINSKI, D., BAKER, R. Three-dimensional slope stability: End effects. **Soils and Foundation**, Tokyo, 26(4), 98-110. 1986.

LESHCHINSKI, D., BAKER, R., SILVER, M.L. Three-dimensional analysis of slope stability. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 9, 199-223. 1985.

LESHCHINSKI, D., HUANG, C.-C. Generalized three-dimensional slope-stability analysis. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, 118(11), 1748-1764. 1992.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. ESALQ/USP. Piracicaba-SP. 2nd ed., 497p. 2000.

LIBARDI, P.L., REICHARDT, K., NIELSEN, D.P., BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, 44, 3-7. 1980.

LIN, H.C., RICHARDS, D.R., TALBOT, C.A., YEH, G.T. CHENG, J.R., CHENG, H.P., JONES, N.L. FEMWATER. A three-dimensional finite element computer model for simulation of density-dependent flow and transport in variably saturated media. **United States Waterways Experiment Station**, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, Miss., Technical Report CHL-97-12. 1997.

LIRITANO, G., VERSACE, P., SIRANGELO, B. Real-time estimation of hazards for landslides triggered by rainfall. **Environmental Geology**, 35 (2-3), 175-183, 1998.

LIU, J.G., MASON, P.J., CLERICI, N., CHEN, S., DAVIS, A., MIAO, F., DENG, H., LIANG, L. Landslide hazard assessment in the Three Gorges area of the Yangtze river using ASTER imagery: Zigui-Badong. **Geomorphology** 61, 171-187. 2004.

LOCAT, J., LEROUEIL, S. Landslides stages and risk assessment issues in sensitive clays and other soft sediments. In: Cruden, D.; FEEL, R. (eds.) **Landslide Risk Assessment**. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment. Honolulu. A.A. Balkema. Rotterdam, 261-269. 1997.

LUMB, P. Slope failures in Hong Kong. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, 8, 31-95. 1975.

LUZI, L., PERGALANI, F., TERLIEN, M.T.J. Slope vulnerability to earthquakes as subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems. **Engineering Geology**, 58, 313–336. 2000.

MAGLIULO, P., DI LISIO, A., RUSSO, F., ZELANO, A. Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics: a case study in southern Italy. **Natural Hazards**, 47, 411-435. 2008.

MANKELOW, J.M., MURPHY, W. Using GIS in the probabilistic assessment of earthquake triggered landslide hazards. **Journal of Earthquake Engineering**, 2(4), 593–623. 1998.

MANTOVANI, F., SOETERS, R., VAN WESTEN, C.J. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. **Geomorphology**, 15, 213-225. 1996.

MANTOVANI, F., SOETERS, R., VAN WESTEN, C.J. Remote sensing techniques for landslides studies and hazard zonation in Europe. **Geomorphology** 15, 213-225. 2002.

MARINELLI, F., DURNFORD, D.S. Semianalytical solution to Richards equation for layered porous media. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering.**, 124 (6), 290-299. 1998.

MARK, R.K., Map of debris flow probability, San Mateo County, California scale 1:62,500. **US Geological Survey Miscellaneous Investigation Map**, I-1257-M. 1992.

MASON, P.J., ROSENBAUN, M.S. Predicting future landslides in a residential area on the basis of geohazard mapping: the Langhe Hills in Piemonte, NW Italy. **Quartely Journal of Engineering Geology and Hydrology**, 35, 317-326. 2002.

MATOS, M.M. Stability of slopes in residual soils. **Master Thesis - Department of Civil Engineering** - University of Alberta, Canadá, 220p. 1974.

MAYORAZ, F., CORNU, T., VULLIET, L., Using neural networks to predict slope movements. In: **Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Landslides**, Balkema, Rotterdam, pp. 295–300. 1996.

MEIN, R.G.; LARSON, C.L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, 9 (2), 384-394. 1973.

MEJÍA-NAVARRO, M., WOHL, E.E., OAKS, S.D. Geological hazards, vulnerability and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado. **Geomorphology**, 10, 331-354. 1994.

MENON, B.A., Quantitative analysis of springs. **Environmental Geology**, 26, 111-120. 1995.

MILLINGTON, R.J., QUIRK, J.P. Permeability of porous media. **Nature**, 183, 387-388. 1959.

MIYAZAKI, T. **Water flow in soils**. New York, Marceli Dekker, Inc. 1993.

MODENESI, M.C. 1988b. Quaternary Mass Movements in a Tropical Plateau (Campos do Jordão - São Paulo). **Zeitschrift Für Geomorphologie**. 32(4), 425-440.1988b.

MODENESI-GAUTTIERI, M.C., HIRUMA, S.T., RICCOMINE, C. Morphotectonics of a high plateau on the northwestern flank of the Continental Rift of Southeastern, Brazil. **Geomorphology**, 43(3/4), 257-271. 2002.

MODENESI, M.S. Intemperismo e morfogênese no planalto de Campos do Jordão. **Revista Brasileira de Geociências**, 10, 213-225. 1980.

MODENESI, M.S. Weathering and morphogenesis in tropical plateau. **Catena**, 10(3), 237-251. 1983.

MONTGOMERY D.R., DIETRICH, W.E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, 30, p. 1153-1171. 1994.

MONTGOMERY, D.R., DIETRICH, W.E., TORRES, R., ANDERSON, S.P., HEFFNER, J.T., LOAGUE, K. Hydrologic response of a steep unchanneled valley to natural and applied rainfall. **Water Resource Research**, 33, 91-109. 1997.

MONTGOMERY, D.R., DIETRICH, W.E., HEFFNER, J.T. Piezometric response in shallow bedrock at CB1: Implications for runoff generation and landsliding. **Water Resource Research**, 38 (12), 1274. 2002.

MOORE, I.D. Infiltration equation modified for subsurface effects. **Journal of Irrigation and Drainage Division**. ASCE, 107, 71-86. 1981.

MOREL-SEYTOUX, H.J., KANJI, J. Derivation of an equation of infiltration. **Water Resources Research**, 104(4). 795-800. 1974.

MORGENSTERN, N.R. The role of analysis in the evaluation of slope stability. Landslides, In: **International Symposium on Landslide**, Rotterdam, Balkema, 1615-1629. 1995.

MORGENSTERN, N.R., SANGREY, D.A. Methods of stability analysis. In: Landslides: analysis and control. Schuster, R.L., Krizek, R.J. (eds.). Transport research board, Special report n. 176. **National Academy of Sciences**, 155-171. 1978.

MOSTYN, G.R., SMALL, J.C. Methods of stability analysis. In: Walker, B., Fell, R. eds. **Soil slope instability and stabilization**, cap. 3, 71-113. 1987.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research** 12 (3), 513-522, 1976.

NASH, D. A comparative review of limit equilibrium methods of slope stability analysis. In: Anderson, M.G., Richards, K.J. (eds), **Slope stability**. Wiley, New York, 11-75. 1987.

NEELEY, M.K., RICE, R.M. Estimating risk of debris slides after timber harvest in northwestern California. **Bulletin American Association of Engineering Geologists**, 27 (3), 281-289. 1990.

NEULAND, H. A prediction model of landslips. **Catena**, 3, 215-230. 1976.

NEUMAN, S.P. Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt. **Water Resources Research**, 12, 564-566. 1976.

NILSEN, T.H., BRABB, E.E. Slope stability studies in the San Francisco Bay region, California. Geological Society of America, **Reviews in Engineering Geology**, 3, 235-243. 1977.

NG, C.W.W., WANG, B., TUNG, Y.K. Three-dimensional numerical investigations of groundwater responses in an unsaturated slope subjected to various rainfall patterns. **Canadian Geotechnical Journal** 38, 1049-1062, 2001.

NG., C.W.W., SHI, Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage. **Computers and Geotechnics**, 22 (1), 1-28. 1998.

OGDEN, F.L., SAGHAFIAN, B. Green and Ampt Infiltration with Redistribution. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 123 (5), 386-393. 1997.

OJEDA-MONCAYO, J, LOCAT, J, COUTURE, R, LEROUEIL, S. The magnitude of landslides: an overview. In: Lacerda WA, Ehrlich M, Fontoura SAB, Sayao ASF (eds) **Landslides: evaluation and stabilization**. Balkema, Taylor & Francis Group, London, pp 379–384. 2004.

OKIMURA, T., KAWATANI, T. Mapping of the potential surface-failure sites on granite slopes. In: Gardiner, E. (Ed.), **International Geomorphology**, Part I. Wiley, Chichester, 121-138. 1987.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, 22(5), 794-804. 1986.

ONLINE ETYMOLOGY DICTIONARY. <<http://www.etymonline.com>> Acesso em: 16 de março de 2009.

PARISE, M. Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. **Physics and Chemistry of the Earth (C)**, 26, n.9, 697-703. 2001.

PHILIP, J.R. Sorptivity and algebraic infiltration equations. **Soil Science**, 84, p. 257-264. 1957.

PHILIP, J.R. Falling-head ponded infiltration with evaporation. **Journal of Hydrology**, 138, 591-598. 1992b.

PHILIP, J.R. Variable-head ponded infiltration under constant or variable rainfall. **Water Resources Research** , 29(7), p. 2155-2165. 1993.

PINTO, N.L.S., HOLTZ, A.C.T., MARTINS, J.A., GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia básica**. São Paulo, Edgard Blücher; Rio de Janeiro, Fundação Nacional de Material Escolar, 280p. 1976.

PISTOCCHI, A., LUZI, L., NAPOLITANO, P. The use of predictive modeling techniques for optimal exploitation of spatial databases: a case study in landslide hazard mapping with expert system-like methods. **Environmental Geology**, 41, 765-775. 2002.

PRADEL, D.; RAAD, G. Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes. **Journal of geotechnical engineering**, v. 119, n.2, p.315-332. 1993.

RAGOZIN, A.L. Modern problems and quantitative methods of landslide risk assessment. In: Senneset (ed.), **Landslides**, Balkema, Rotterdam, 339-344. 1996.

RAGOZIN, A.L. Basic principles of natural hazard risk assessment and management. **7<sup>th</sup> International IAEG Congress**. Balkema, Rotterdam, 1277-1286. 1994.

RAHARDJO, H., LIM, T.T., CHANG, M.F., FREDLUND, D.G. Shear-strength characteristics of a residual soil. **Canadian Geotechnical Journal**, 32, 60-77. 1995.

RAATS, P.A.C. Development in soil-water physics since the mid 1960s. **Geoderma**, 100, p.355-387. 2001.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 12, 211-216. 1988.

REICHARD, K. Revisão da literatura: variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 10(1), 1-6. 1986.

REIS, R.M., VILAR, O.M. Resistência ao cisalhamento de dois solos residuais de gnaiss não saturado. In: **Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, 5, São Carlos. Anais, ABMS, 1, 109-114. 2004.

REMONDO, J., BONACHEA, J., CENDRERO, A. A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: from landslide susceptibility to quantitative risk assessment. **Landslides** (2), 321-328, 2005.

RICCOMINI, C. O rift continental do sudoeste do Brasil. **Tese (Doutorado), Instituto de Geociências**, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 256p. 1989.

RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids in porous mediums. **Physics** 1: 318-333. 1931.

RÖHM, S.A., VILAR, O.M. Shear strength of an unsaturated soil. In: **International Conference on Unsaturated Soils**, 1, Paris, France. Proceedings, 1, 189-193. 1995.

ROTH, R.A. Factors affecting landslide susceptibility in San Mateo County, California. **Association of Engineering Geologists Bulletin**, 20 (4), 353-372. 1983.

SABOYA JR., F.S., ALVES, M.G, PINTO, W.D. Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic. **Engineering Geology**, 86, 2006.

SANCIO, R. General report - slope stability analysis. In: **Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Taludes**, 3, p137-144. 1997.

SANTACANA, N., BAEZA, B., COROMINAS, J. PAZ, A., MARTURIÁ, J. A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). **Natural Hazards** 30, 281-295. 2003.

SARKAR, S., ANBALAGAN, R. Landslide hazard zonation mapping and comparative analysis of hazard zonation maps. **Journal of Mountain Science**, 5, n.3. 2008.

SCOTT, H.D. Soil water flow process in the field. In: **Soil Physics - Agricultural and Environmental Applications**. Iowa State University Press, 421p. 2000.

SCHULZ, W.H. Landslide Susceptibility Estimated From Mapping Using Light Detection and Ranging (LIDAR) Imagery and Historical Landslide Records, Seattle, Washington. **US Geological Survey**. 2005.

SEELEY, M.W., WEST, D.O. Approach to geologic hazard zoning for regional planning, Inyo National Forest, California and Nevada. **Bulletin American Association of Engineering Geologists**, 27 (1), 23-35. 1990.

SHARMA, M.L. **Groundwater recharge**. Balkema, Brookfield, VT, p.323. 1989.

SIMUNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. Th., SEJNA, M. The Hydrus-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 3.0, **HYDRUS Software Series 1**, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, 270 pp., 2005.

SIMUNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. Th., GRIBB, M. M., HOPMANS, J.W. Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow

processes, **Soil & Tillage Research**, 47 (1-2), Special issue "State of the art in soil physics and in soil technology of anthropic soils", 27-36, 1998.

SKONARD, C.J., MARTIN, D.L. A Physically Based Two-Dimensional Infiltration Model for Furrow Irrigation. **ASAE Annual International Meeting**, 022063. 2002.

SMITH, R.E., CORRADINI, C., MELONE, F. Modelling infiltration for multistorm runoff events. **Water Resources Research**, 29, 133-144. 1993.

SOETERS, R., VAN WESTEN, C.J. Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: A.K. Turner and R.L. Schuster, Editors, **Landslides. Investigation and mitigation**, Nat. Acad. Press, Washington, D.C., pp. 129–177. Transportation Research Board, special report, 247. 1996.

SPIERENBURG, S.E.J.; VAN ESCH, J.M.; KOEHORST, B.A.N. Slope stability during infiltration. In: ALONSO & DELAGE, ed. **Unsaturated Soils**. p. 309–314. 1995.

STEVENSON, P.C. The evolution of a risk-zoning system for landslide areas. **United States Geological Survey**. 1978.

SÜZEN, M.L., DOYURAN, V. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu Catchment, Turkey. **Engineering Geology**. 71:303–321. 2004.

SÜZEN, M.L.; DOYURAN, V. A comparison of the GIS based susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. **Environmental Geology** 45, 665-679. 2004.

SWARTZENDRUBER, D. Derivation of a two-term infiltration equation from the Green-Ampt model. **Journal of Hydrology** 236, 247-251, 2000.

SWARTZENDRUBER, D., CLAGUE, F.R. An inclusive infiltration equation for downward water entry into soils. **Water Resources Research**, 25 (4), 619-626. 1989.

TANGESTANI, M.H., Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma operation in a GIS, Kakan catchment area, Iran. In: **Map India Conference 2003, Disaster Management**. 2003.

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. **5 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia** - CBGE, 2, 225-236. 1987.

TERLIEN, M.T.J. The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. **Environmental Geology**, 35 (2-3), 124-130. 1998.

TERLIEN, M.T.J., VAN WESTEN, C.J., VAN ASCH, TH.W.J. Deterministic modeling in GIS-based landslide hazard assessment. In: Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), **Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards**. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 57-77, 1995.

TSUKAMOTO, Y., ISHIHARA, K., NOSAKA, Y. On the initiation of rainfall induced soil failure. In: Marie, Lisac, Szavits-Nossan (eds) **Geotechnical Hazards**. Balkema, Rotterdam, 883-890. 2002.

UGAI, K. Three-dimensional stability analysis of vertical cohesive slopes. **Soils and Found.**, Tokyo, 25(3), 41-48. 1985.

UGAI, K., HOSOBORI, K. Extension of simplified Bishop method, simplified Janbu method and Spencer method to three-dimensions. Proceedings, **Japanese Society of Civil Engineers.**, Tokyo, 394/III-9, 21-26. 1988.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. <<http://www.usgs.gov>> acesso em: 16 de março de 2009.

USDA Soil Conservation Service. Hydrology. **National Engineering Handbook**. Section 4, supplement A. 1957.

VANAPALLI, S.K., FREDLUND, D.G. Comparison of different procedures to predicted unsaturated soil shear strength. In: **Advanced in unsaturated geotechnics. Geotechnical Special Publication** n.99 - ASCE. Shackelford, D.C. 2000.

VAN DEN EECKHAUT, M., REICHENBACH, P., GUZZETTI, F., CARRARA, A., ROSSI, M., POESEN, J. Landslide susceptibility zonation in the Flemish Ardennes, Belgium, using multiple statistical models and different mapping units. **Geophysical Research Abstracts**, 10. 2008.

VAN GENUTCHEN, M. Th., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, **Soil Science Society of America Journal**, 44, 892-898, 1980.

VAN WESTEN, C.J. Training package for Geographic Information System in slope stability zonation. **ITC Publication**, Enschede, The Netherlands, 15, 245 p. 1993.

VAN WESTEN, C.J. GIS in landslide hazard zonation: a review with examples from the Colombian Andes. In: **Mountain Environment and Geographic System**, Price, M.F., Heywood, D.I. (Eds.) Taylor and Francis, London, 135-165. 1994.

VAN WESTEN, C.J, RENGERS, N., TERLIEN, M.T.J., SOETERS, R. Prediction of the occurrence of slope instability phenominal through GIS-based hazard zonation. [Geologische Rundschau](#) 86 (2), 404-414, 1997.

VAN WESTEN, C.J., SEIJMONSBERGEN, A.C., MANTOVANI, F. Comparing landslide hazard maps. **Natural Hazards**, 20, 137-158. 1999.

VAN WESTEN, C.J., VAN ASCH, T.W.J., SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult?. **Bulletin of Engineering Geology and Environment**, 65, 167-184. 2006.

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, 491-500. 1986.

VARNES, D.J. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. – Commission on Landslides of the IAEG. **Natural Hazards**, 3. – UNESCO, Paris, 61p. 1984.

VARNES, D.J. Landslide hazard zonation — a review of principles and practice, **IAEG Commission on Landslides**, UNESCO, Paris, p. 63. 1993.

VARNES, D.J. Landslides Types and Processes. In: **Landslides and Engineering Practice**. E.B.Eckel (ed.). Special report n29, Highway Research Board, p.20-47. 1978.

VARNES, D.J. Slope movement types and process of landslides: Analysis and control. United States. National Academy of Sciences, National Research Council, **Transportation Research Board Special Report** pp 11–33. 1978.

VAUNAT, J., LEROUEIL, S., Analysis of post-failure slope movements within the framework of hazard and risk analysis. **Natural Hazards**, 26, 83-109. 2002.

VEIHMEYER, F.J., HENDRICKSON, A.H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soil. **Soil Science**, Baltimore, 32, 181-193. 1931.

VIEIRA, A.M. Variação sazonal da sucção em um talude de solo residual de gnaiss. **Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo, 123p. 1999.

VILLELLA, S.M., MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo, **McGraw-Hill do Brasil**, 250p. 1975.

VOGEL, T., CISLEROVÁ, M. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. **Transport in Porous Media** 3, 1-15, 1988.

WANG, C., ESAKI, T., XIE, M., QIU, C. Landslide and debris-flow hazard analysis and prediction using GIS in Minamata-Hougawachi area, Japan. **Environmental Geology**, 51, 91-102. 2006.

WANG, H., WANG, G., WANG, F., SASSA, K., CHEN, Y. Probabilistic modeling of seismically triggered landslides using Monte Carlo simulations. **Landslides**, 5, 387-395. 2008.

WARD, T.J., LI, R.M., SIMONS, D.B. Use of a mathematical model for estimating potential landslide sites in steep forested drainage basins. **IAHS**, 132, 21-41. 1981.

WIECZOREK, G.F. Preparing a detailed landslide inventory map for hazard evaluation and reduction. **Bulletin of the Association of Engineering Geologists**, 21 (3), pp. 337–342. 1984.

WILKINSON, P.L., ANDERSON, M.G., LLOYD, D.M. An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction. **Earth Surface Processes and Landforms**, 27, 1285-1297. 2002.

WILSON, W. Surface flux boundary modeling for unsaturated soils. In: **National Conference of the ASCE Geo Institute**, 1<sup>st</sup>, Utah State University, Logan/Utah, 1-28. 1997.

WILSON, R. C., KEEFER, D. K. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979, Coyote Lake, California earthquake: **Bulletin of the Seismological Society of America**, 73(3), 863–877. 1983.

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.

WP/WLI - UNESCO Working Party on World Landslide Inventory. A suggested method for reporting a landslide. **Bulletin International Association for Engineering Geology**, 41: 5-12. 1990.

WP/WLI – UNESCO Working Party on World Landslide Inventory. **The Multilingual Landslide Glossary**. Bitech Publishers, Richmond, British Columbia, Canadá. 1994.

WU, T.H., ABDEL-LATIF, M.A., WIECZOREK, G. Landslide hazard prediction. In: **Landslides**, Balkema, Rotterdam, 423-428. 1996.

WU, T.H., ABDEL-LATIF, M.A. Prediction and mapping of landslide hazard. **Canadian Geotechnical Journal**, 37, 781-795. 2000.

WU, W. SIDLE, R.C. A distributed slope stability model for steep forested basins. **Water Resources Research** 31, 2097-2110, 1995.

XIE, M. GIS-based three-dimensional landslide hazard assessment: development of theory and a system. Doctor graduation thesis, **Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering**, Kyushu University. 2002.

XIE, M., ESAKI, T., ZHOU, G. Three-dimensional stability evaluation of landslides and a sliding process simulation using a new geographic information systems component. **Environmental Geology**, 43, 503-512. 2003a.

XIE, M., ESAKI, T., ZHOU, G., MITANI, Y. Geographic information systems-based three-dimensional critical slope stability analysis and landslide hazard assessment.

**Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 129(12), 1109–1118. 2003.

XIE, M., ESAKI, T., CAI, M. A GIS-based method for locating the critical 3D slip surface in a slope. **Computers and Geotechnics**, 31, 267-277. 2004a.

XIE, M., ESAKI, T., CAI, M. A time-space based approach for mapping rainfall-induced shallow landslide hazard. **Environmental Geology**, 46, 840-850. 2004b.

XIE, M., ESAKI, T., ZHOU, G. GIS-based probabilistic mapping of landslide hazard using a three-dimensional deterministic model. **Natural Hazards** 33, 265-282. 2004c.

XIE, M., ESAKI, T., CAI, M. GIS-based 3D implementation of three-dimensional limit equilibrium approach of slope stability. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 132(3), 656–660. 2006a.

XIE, M., ESAKI, T., QIU, C., WANG, C. Geographical information system-based computational implementation and application of spatial three-dimensional slope stability analysis. **Computers and Geotechnics**, 33, 260-274. 2006c.

XIE, M., ESAKI, T., QIU, C., MITANI, Y., WANG, C. Spatio-temporal estimation of shallow landslide hazard triggered by rainfall using a three-dimensional model. **Environmental Geology**, 52, 1569-1579. 2007a.

XIE, M., ESAKI, T., QIU, C., JIA, L. Spatial three-dimensional landslide susceptibility mapping tool and its applications. **Earth Science Frontiers**, 14(6), 73-84. 2007b.

XIE, M., ESAKI, T., QIU, C., WANG, C., WANG, Z. Deterministic Landslide Risk Assessment at a Past Landslide Site. **Geotechnical and Geological Engineering**. Online since: Saturday, July 26, 2008.

XIE, M., ZHOU, G., ESAKI, T. Landslide hazard assessment using Monte Carlo simulation based on GIS. The 10<sup>th</sup> Int. Conf. of IACMAG, **International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics**, Tucson, Arizona, 169–173. 2001.

XING, Z. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view. **Journal Geotechnical Engineering Division**, ASCE, 114(6), 658-671. 1987.

YALCIN, A. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. **Catena** 72, 1-12, 2008.

YIN, K.L., YAN, T.Z. Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. **5<sup>th</sup> International Symposium on Landslides**, Lausanne 2, 1269-1272. 1988.

ZANG, X. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view. **Journal Geotechnical Engineering**. Div., ASCE, 114, 658-671. 1987.

ZHU, L., HUANG, J-F. GIS-based logistic regression method for landslide susceptibility mapping in regional scale. **Journal of Zhejiang University SCIENCE A**, 7(12), 2007-2017. 2006

ZIMMERMAN, M., BICHEL, M., KIENHOLZ, H., Mountain hazards mapping in the Khumbu Himal, Nepal, with prototype map, scale 1:50,000. **Mountain Research and Development**, 6 (1), 29-40. 1986.

ZUQUETTE, L.V. **Inventário dos Movimentos Gravitacionais de Massa e Processos Correlatos no município de Campos do Jordão**. 1999.

ZUQUETTE, L.V., GANDOLFI, N. **Cartografia Geotécnica**. São Paulo: Oficina de Textos. 2004.



**APÊNDICE I – Gráficos de umidade volumétrica x profundidade (cm) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 5 de fevereiro de 2001.**

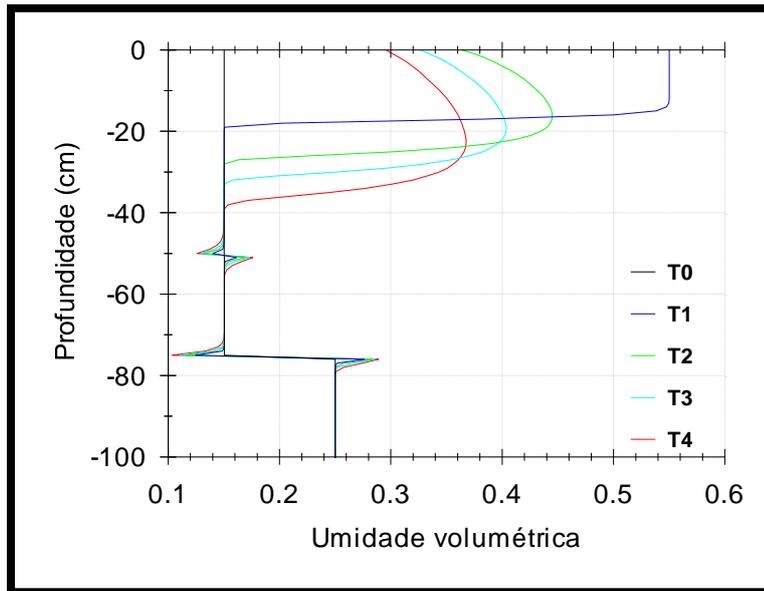


Figura 84 - Unidade 1 - evento de 5 de fevereiro de 2001

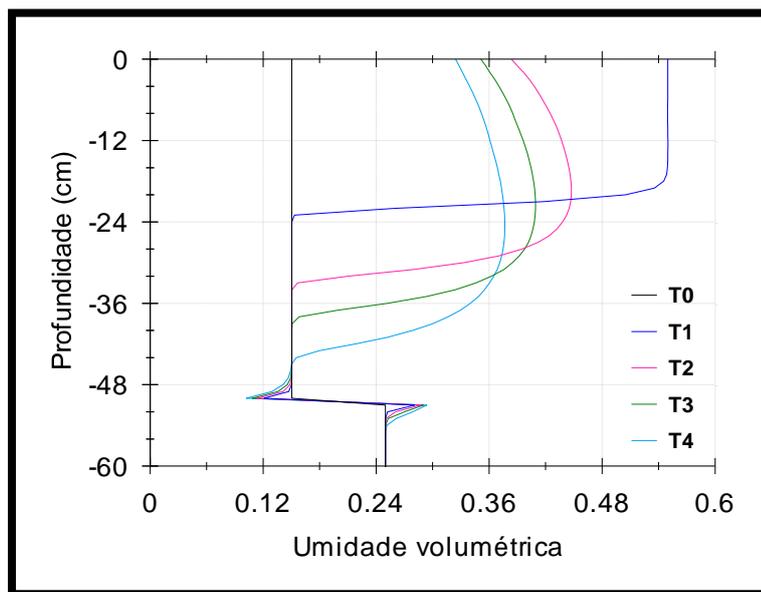


Figura 85 - Unidade 2 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

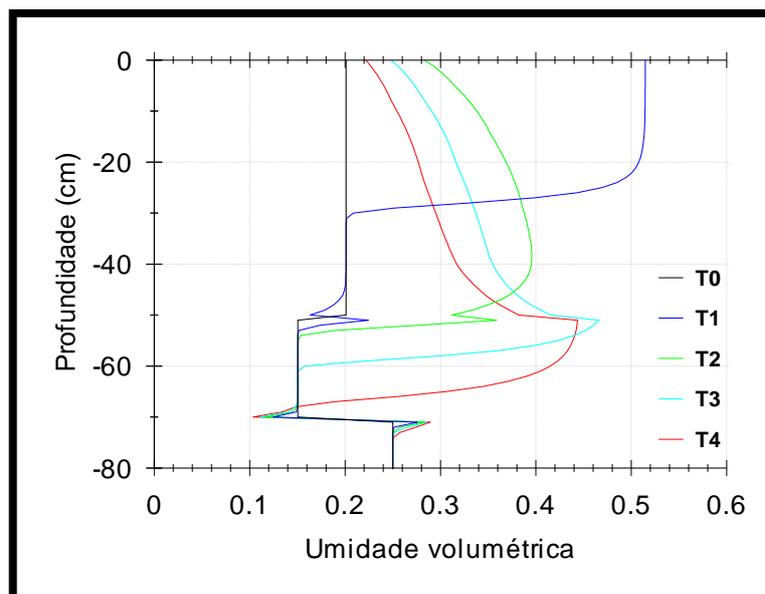


Figura 86 - Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

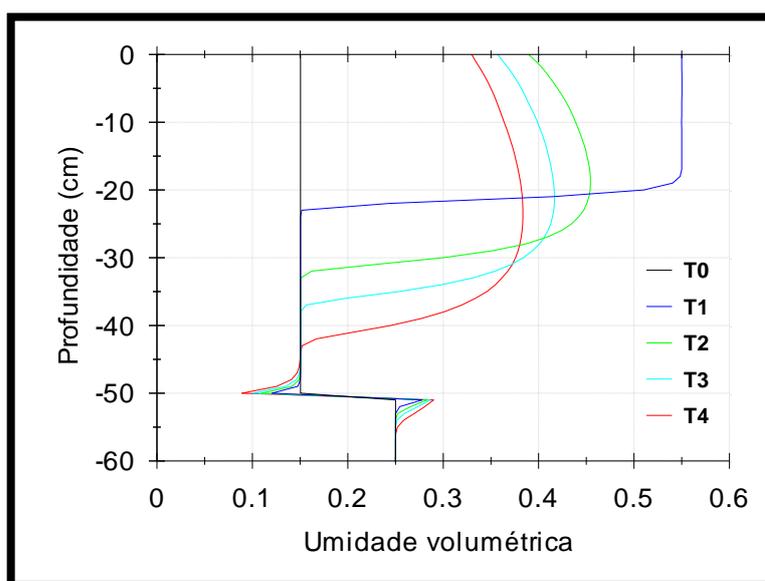


Figura 87 - Unidade 4 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

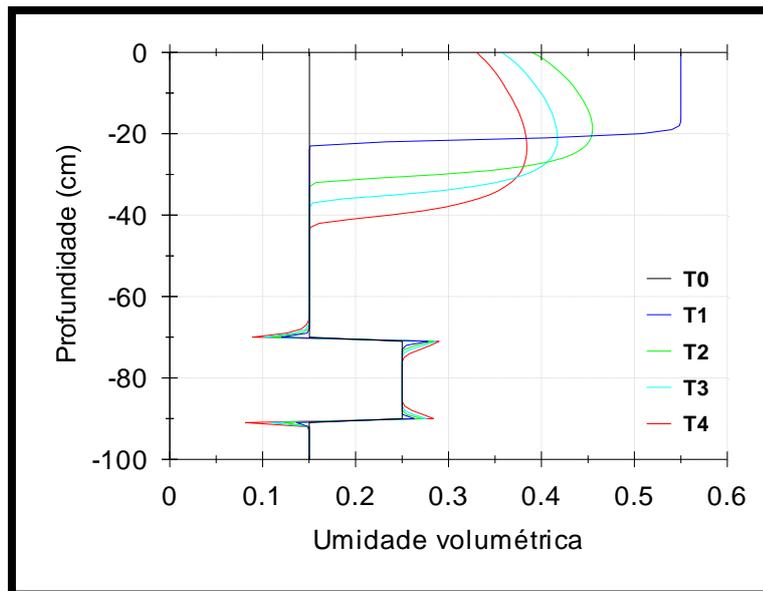


Figura 88 - Unidade 5a - evento de 5 de fevereiro de 2001.

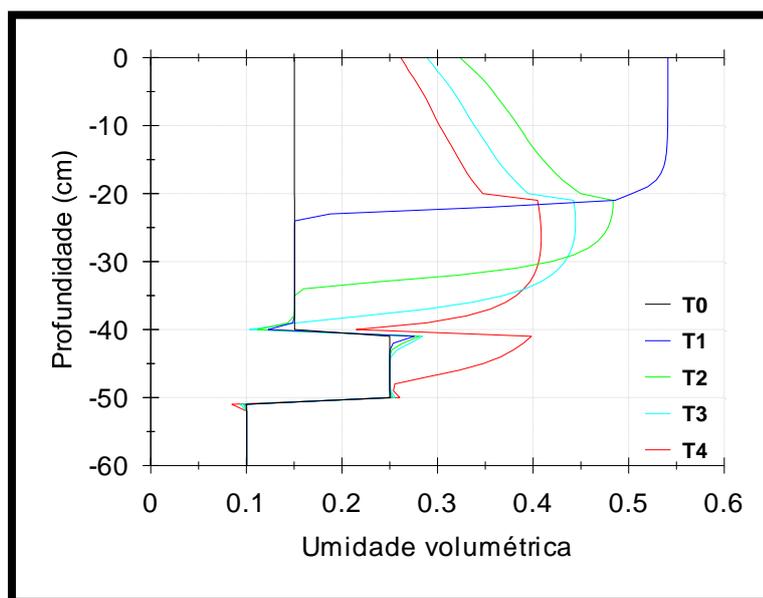


Figura 89 - Unidade 6 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

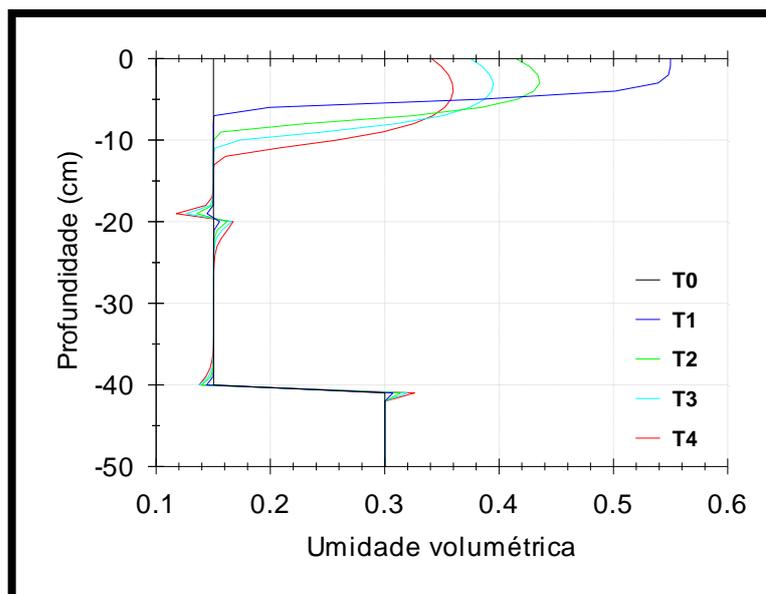


Figura 90 - Unidade 6a - evento de 5 de fevereiro de 2001.

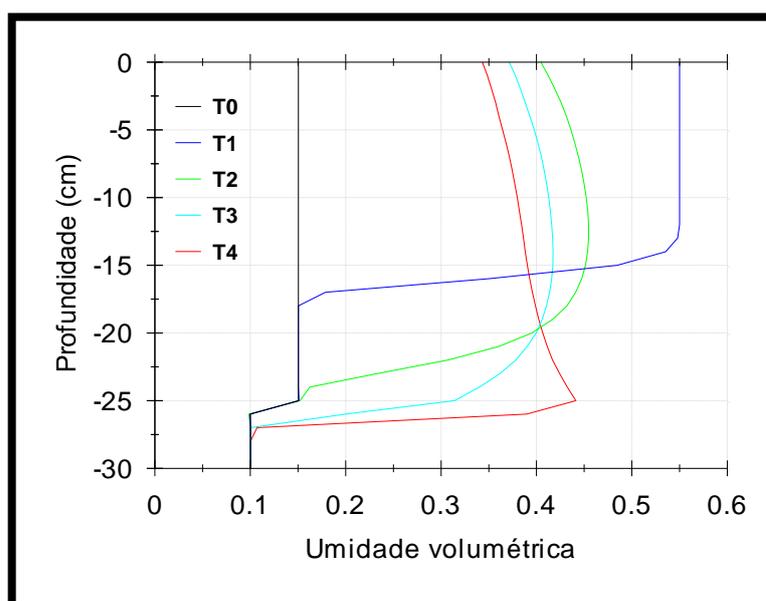


Figura 91 - Unidade 7 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

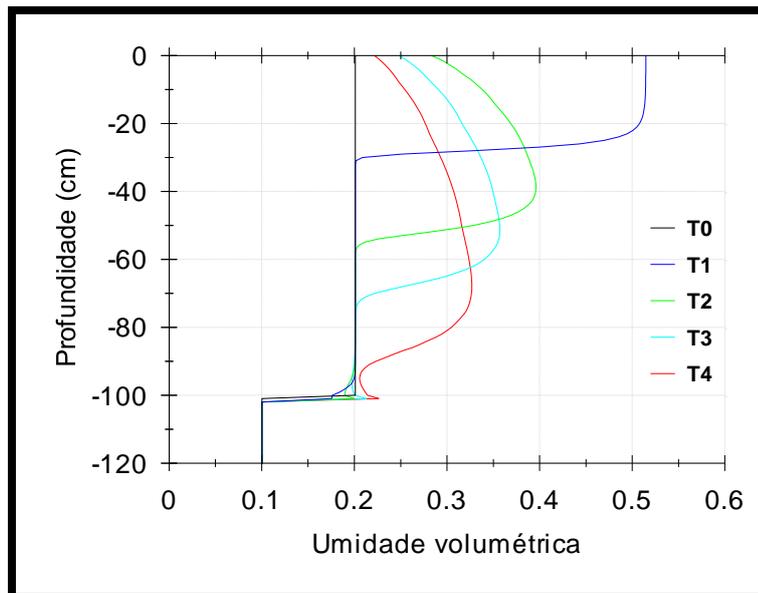


Figura 92 - Unidade 8 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

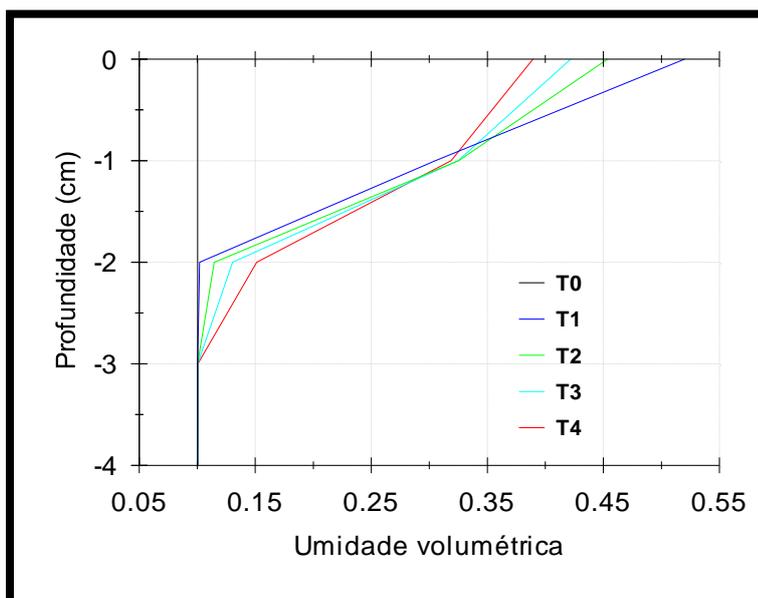


Figura 93 - Unidade 9 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

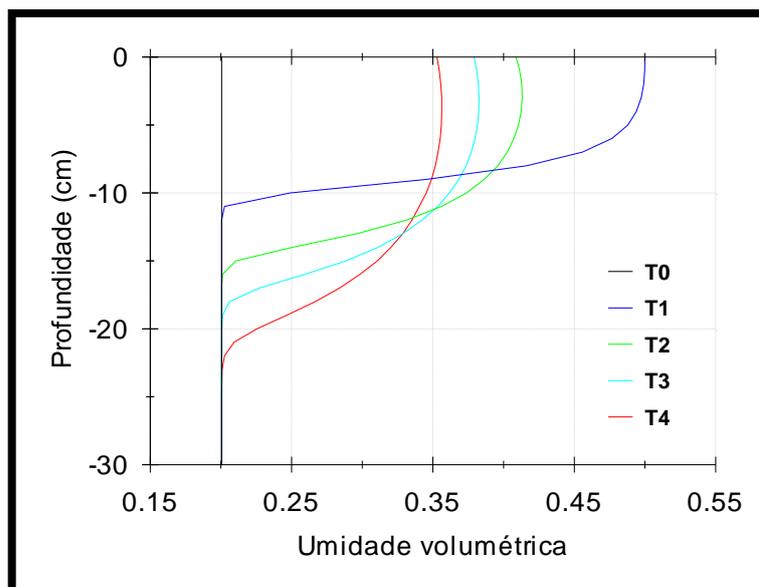


Figura 94 - Unidade 10 - evento de 5 de fevereiro de 2001.



**APÊNDICE II – Gráficos de umidade volumétrica x profundidade (cm) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 13-14 de outubro de 1995.**

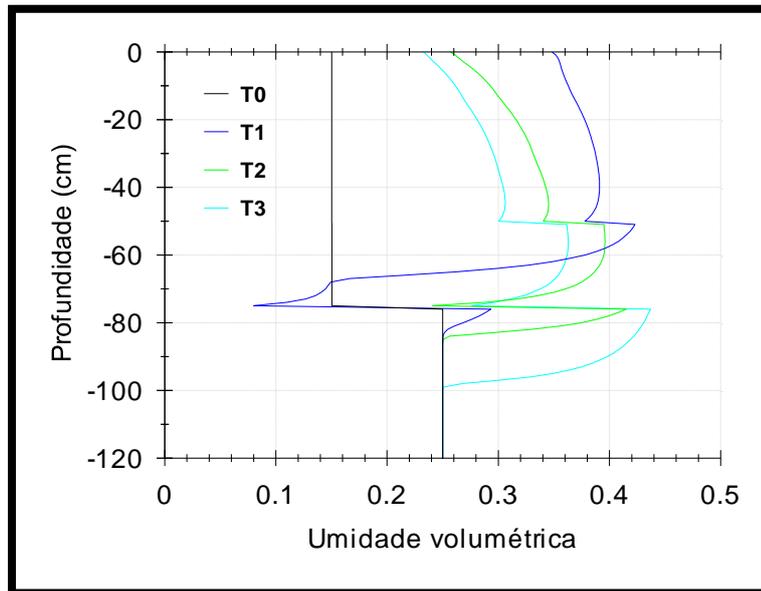


Figura 95 - Unidade 1 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

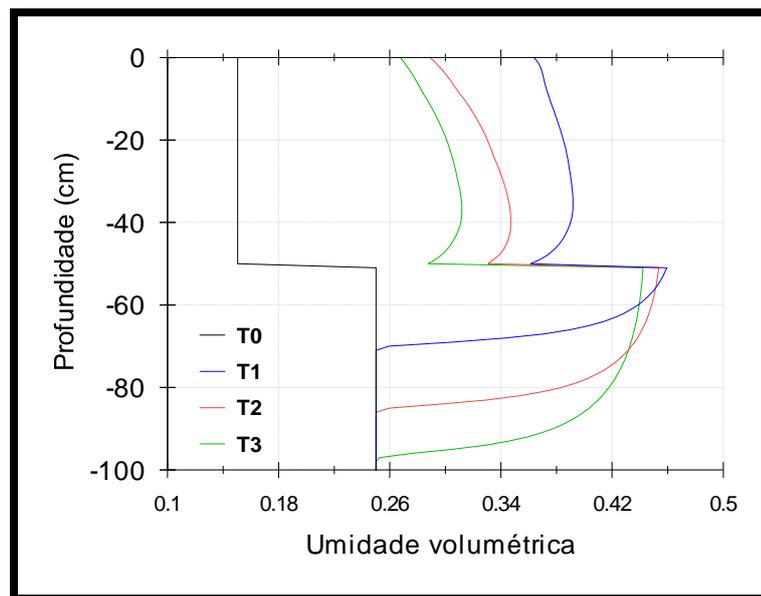


Figura 96 - Unidade 2 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

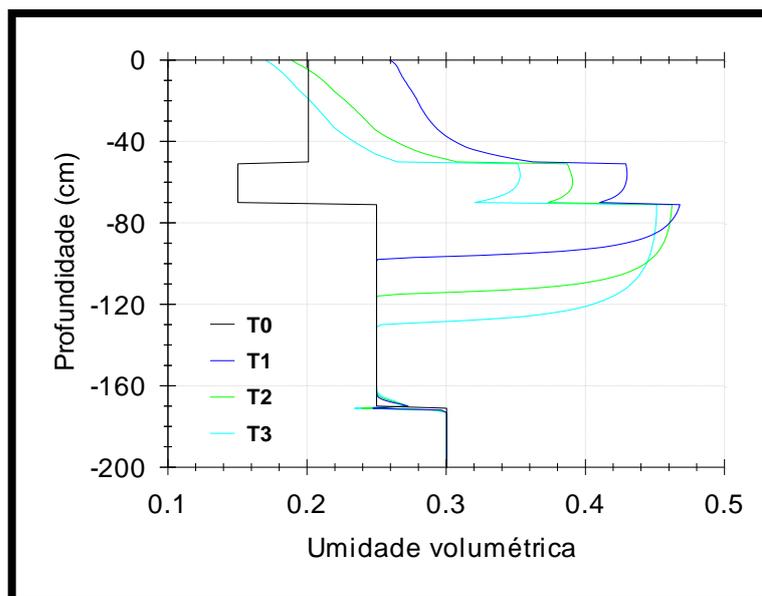


Figura 97 - Unidade 3 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

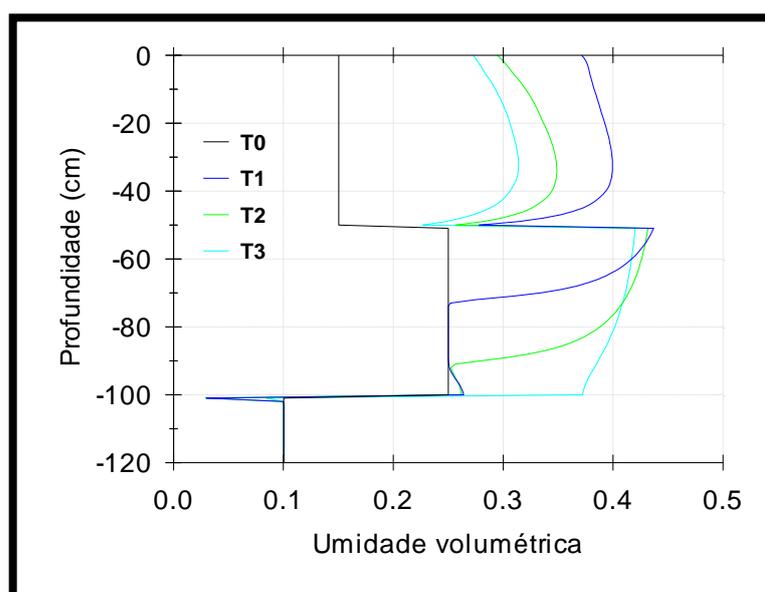


Figura 98 - Unidade 4 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

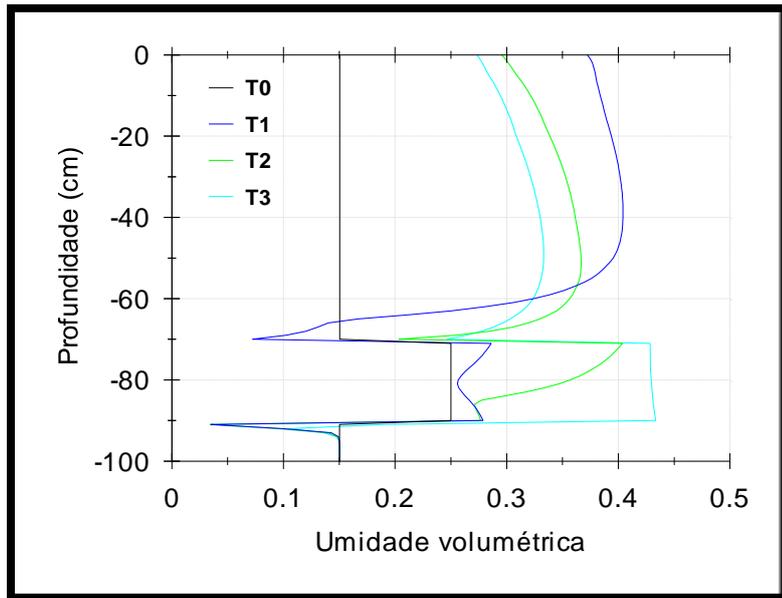


Figura 99 - Unidade 5a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

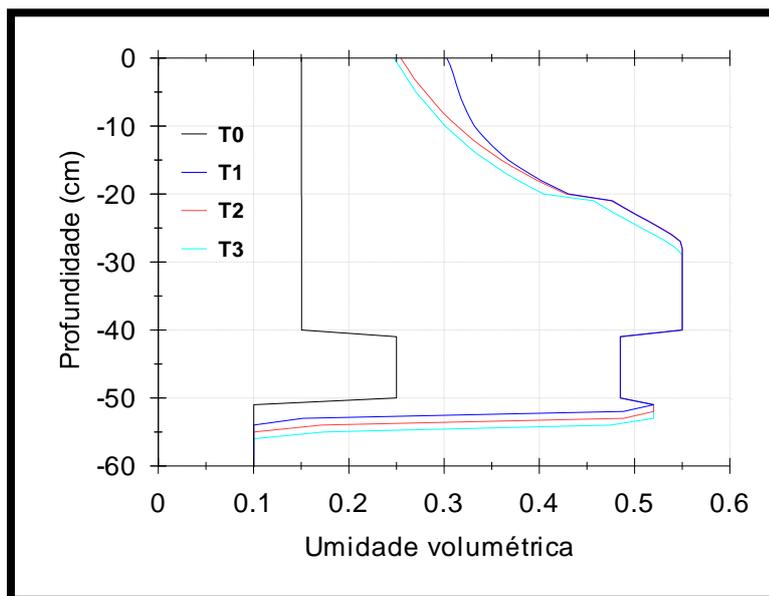


Figura 100 - Unidade 6 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

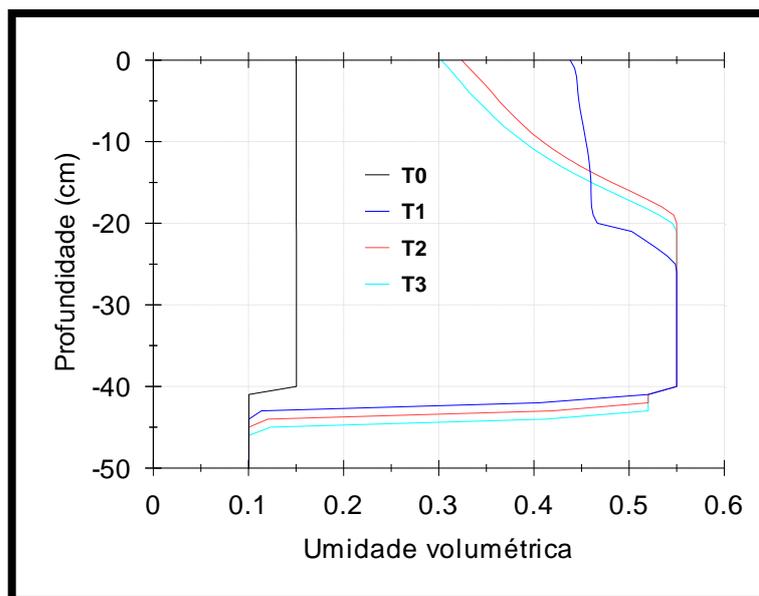


Figura 101 - Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

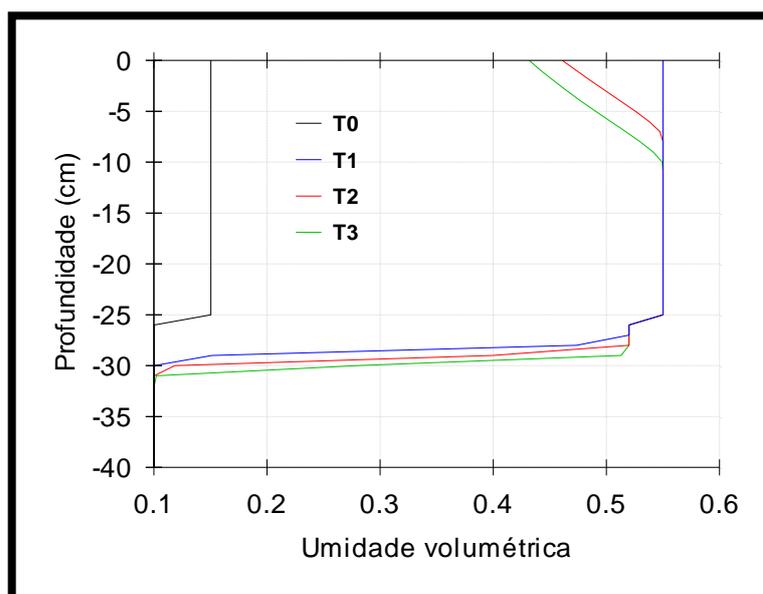


Figura 102 - Unidade 7 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

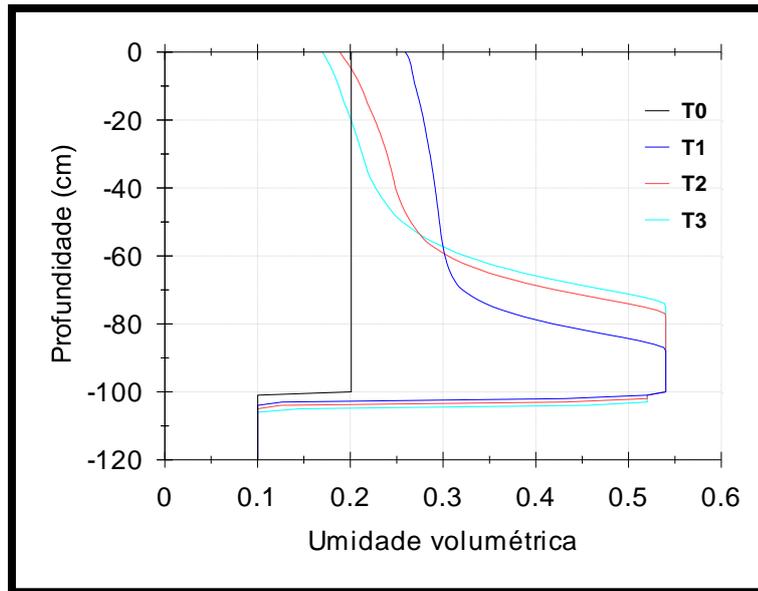


Figura 103 - Unidade 8 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

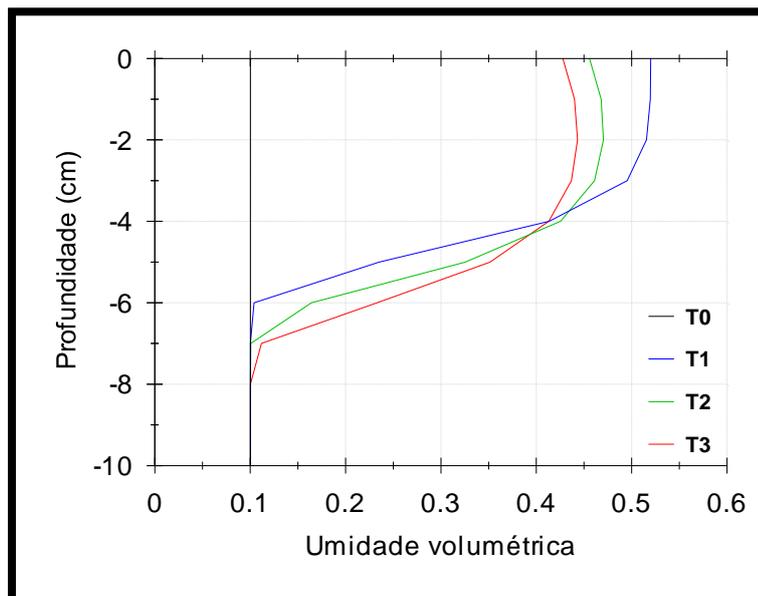


Figura 104 - Unidade 9 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

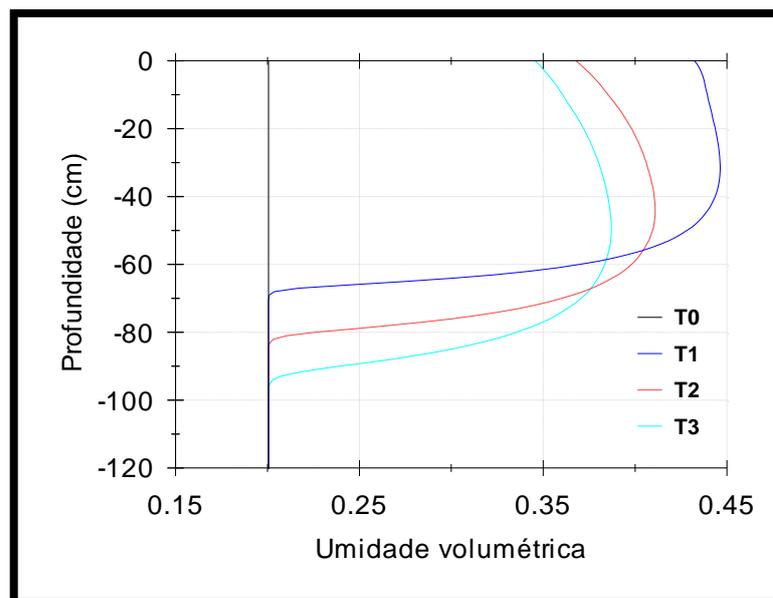


Figura 105 - Unidade 10 - evento de 13-14 de outubro de 1995.



**APÊNDICE III – Gráficos de infiltração (cm/min) x tempo (min) e infiltração acumulada (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 05 de fevereiro de 2001.**

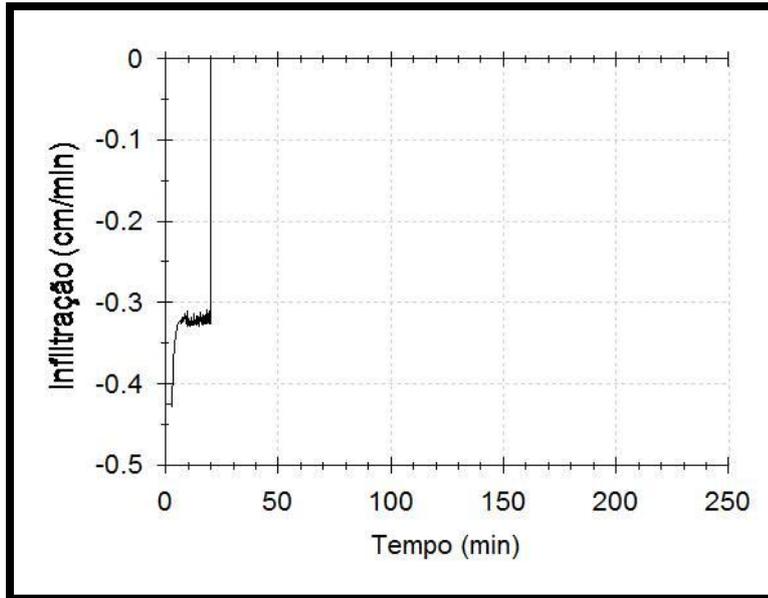


Figura 106 – Unidade 1 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

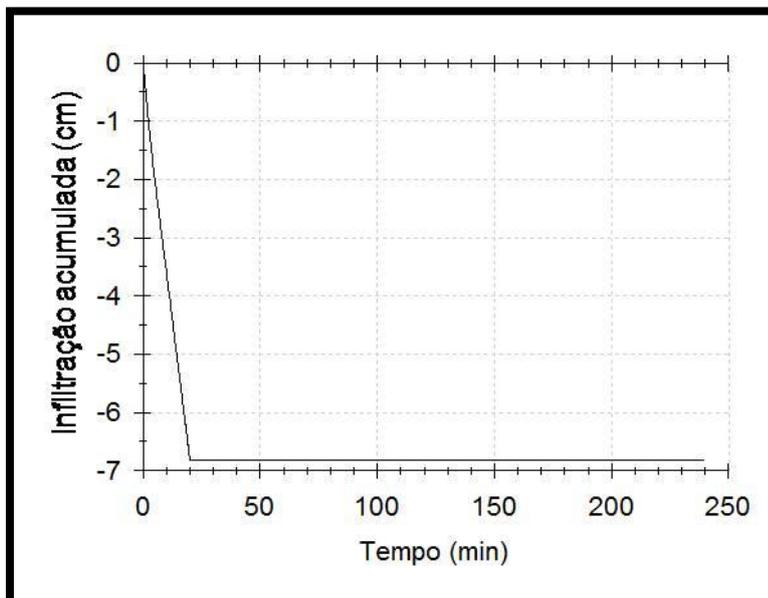


Figura 107 - Unidade 1 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

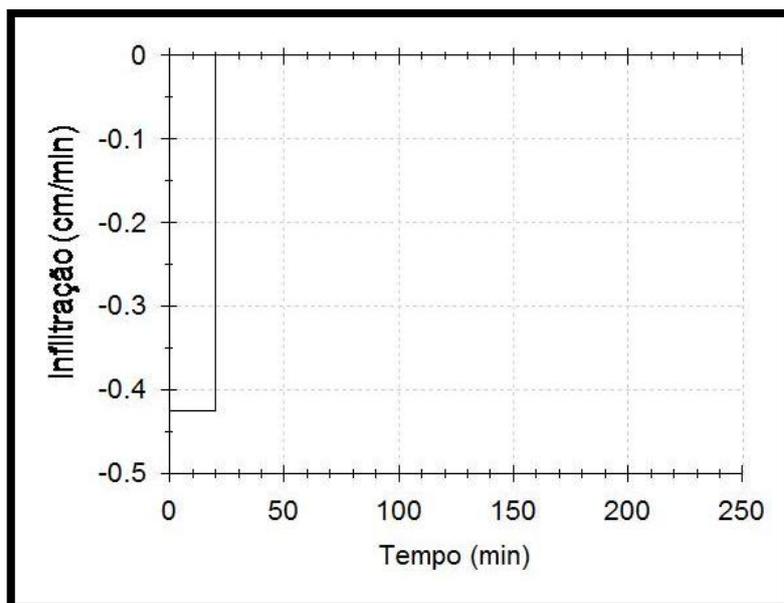


Figura 108 - Unidade 2 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

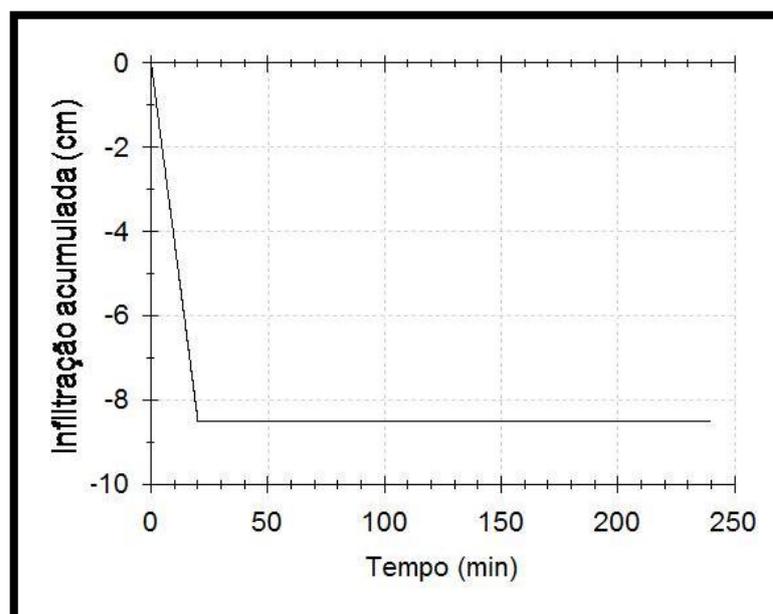


Figura 109 Unidade 2 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

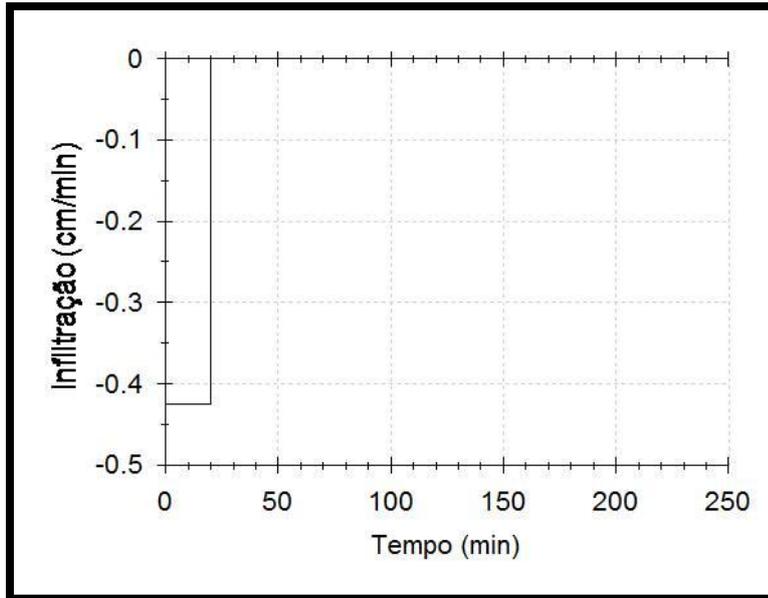


Figura 110 - Unidade 3 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

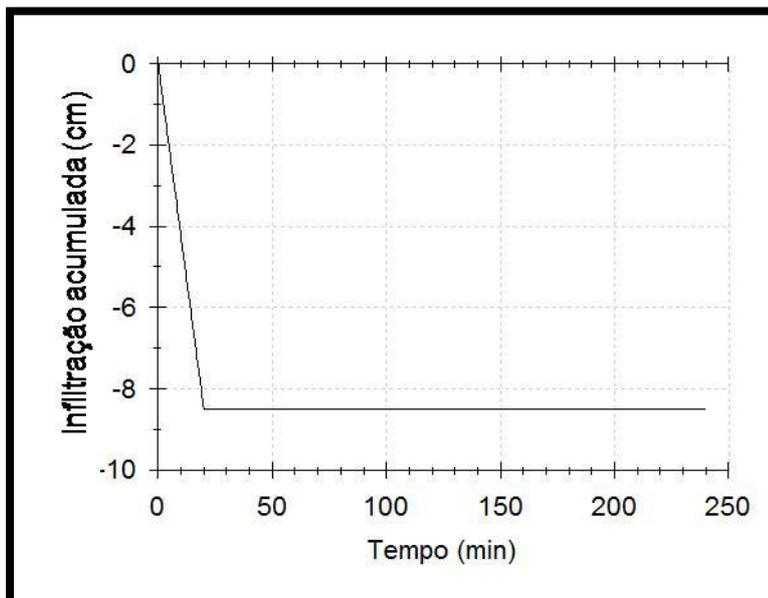


Figura 111 - Unidade 3 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

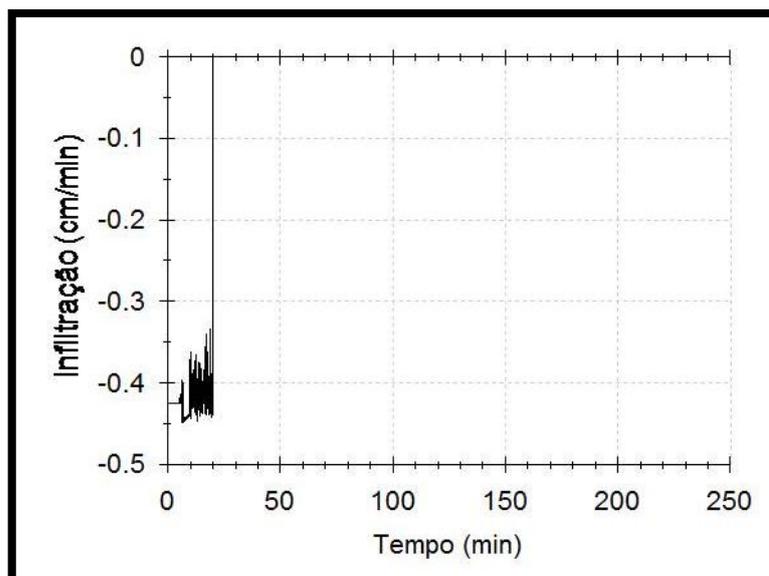


Figura 112 - Unidade 4 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

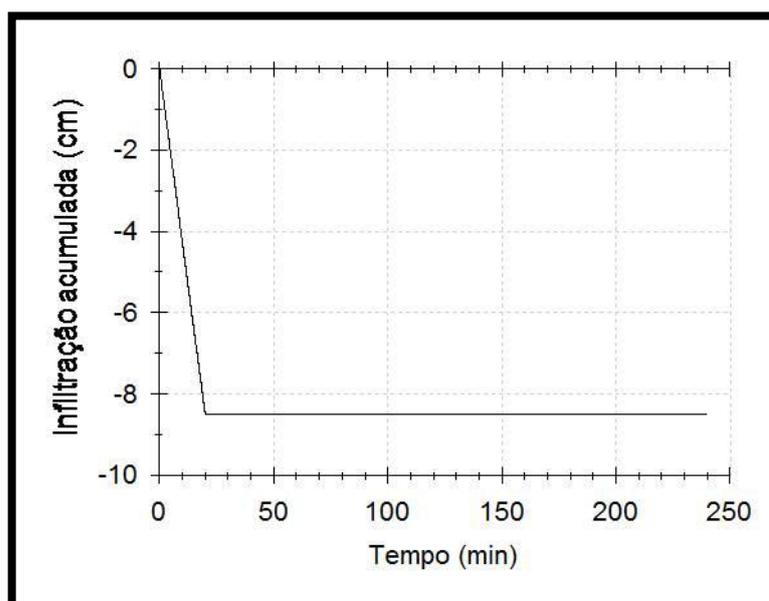


Figura 113 - Unidade 4 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

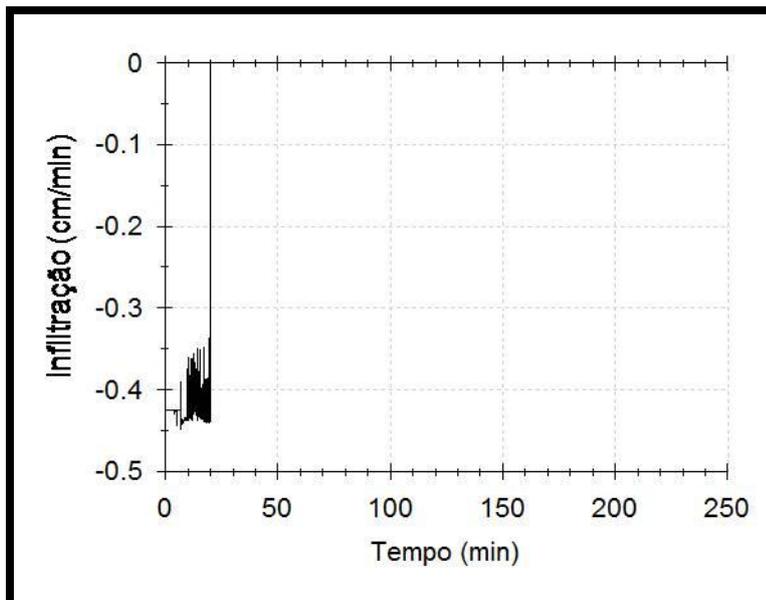


Figura 114 - Unidade 5a – evento de 5 de fevereiro de 2001.

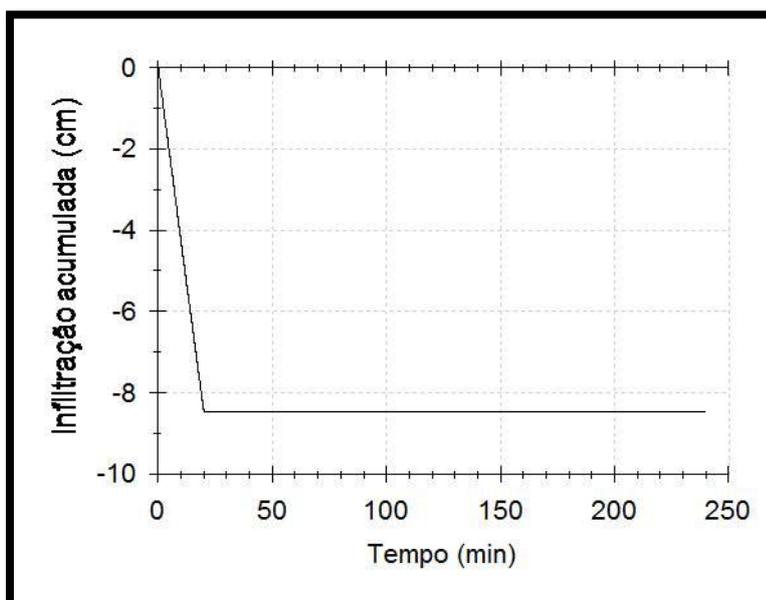


Figura 115 - Unidade 5a – evento de 5 de fevereiro de 2001.

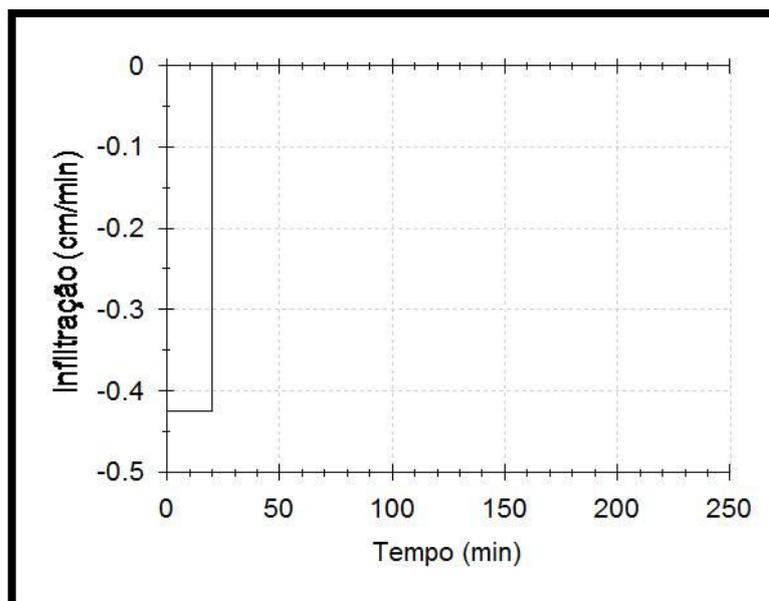


Figura 116 - Unidade 6 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

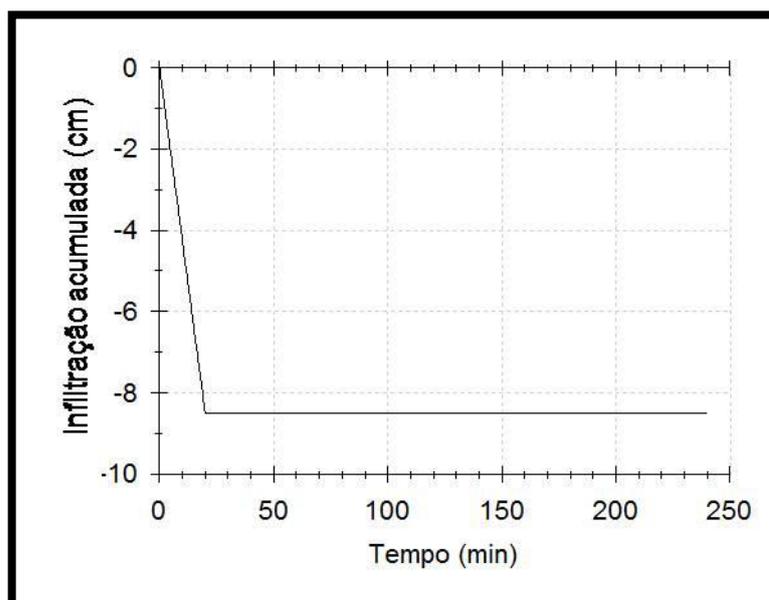


Figura 117 - Unidade 6 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

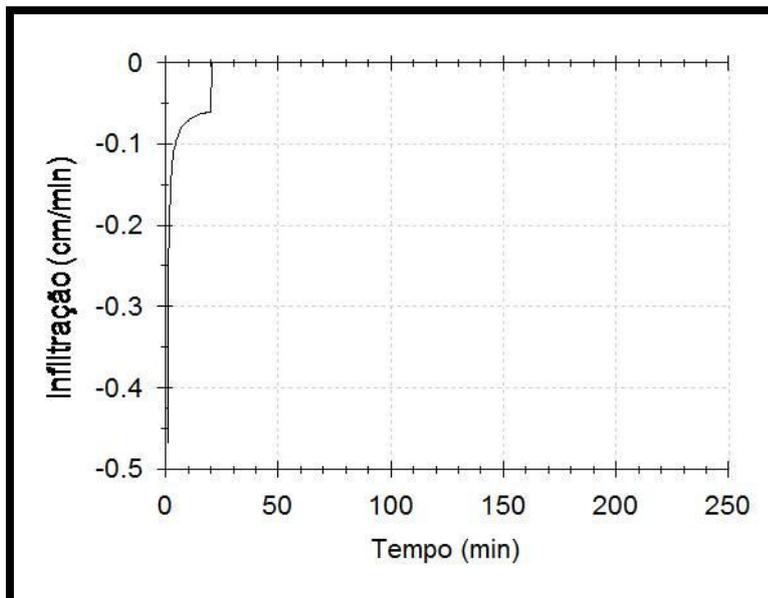


Figura 118 - Unidade 6a – evento de 5 de fevereiro de 2001.

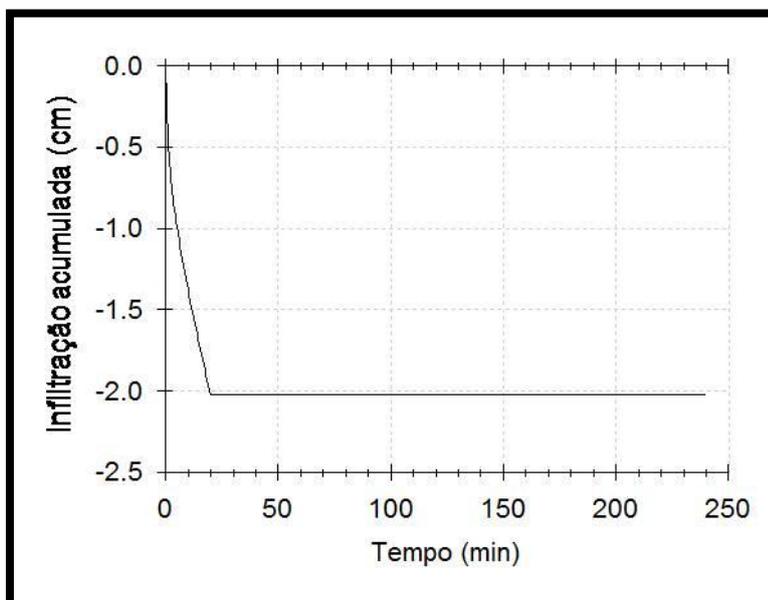


Figura 119 - Unidade 6a – evento de 5 de fevereiro de 2001.

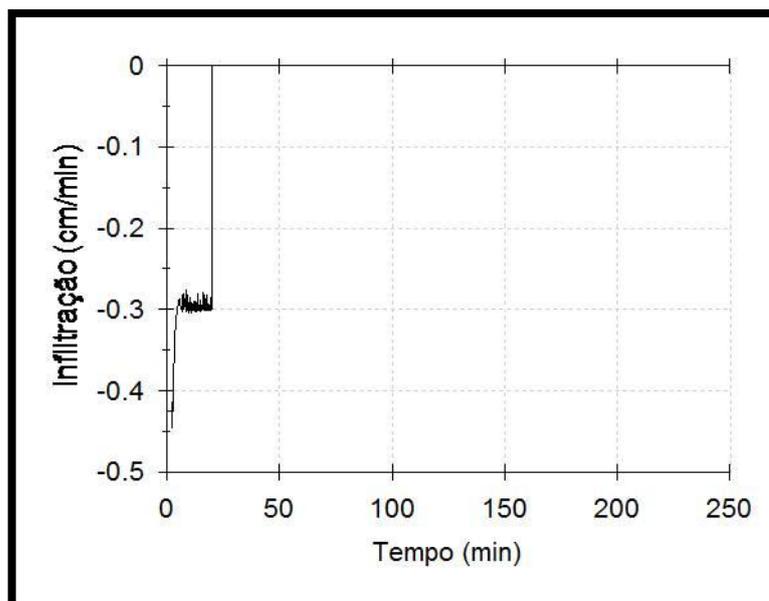


Figura 120 - Unidade 7 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

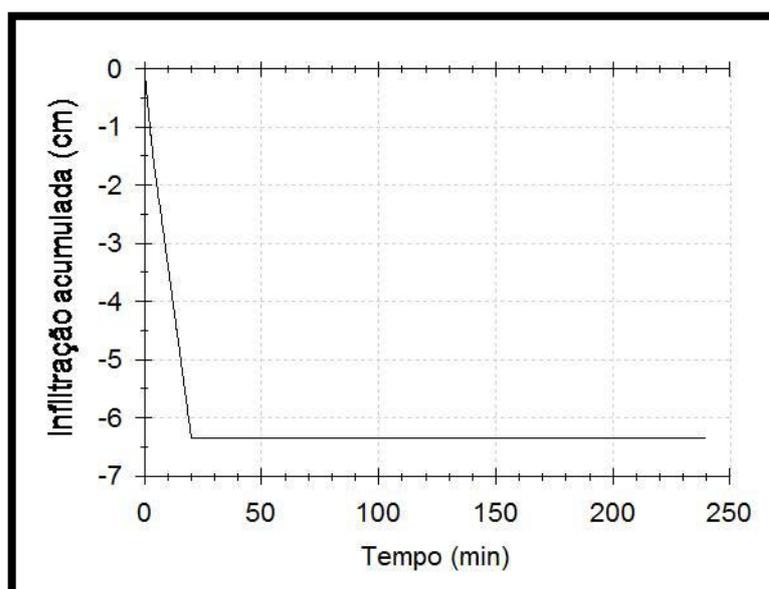


Figura 121 - Unidade 7 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

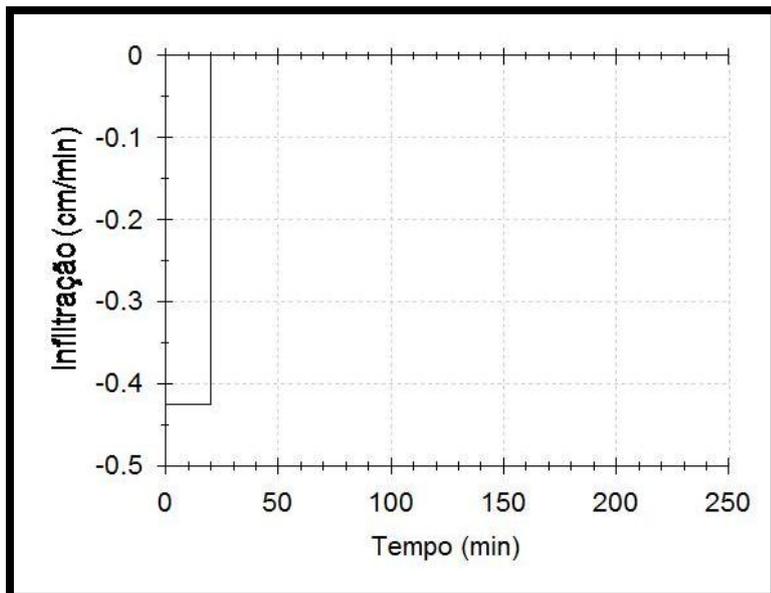


Figura 122 - Unidade 8 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

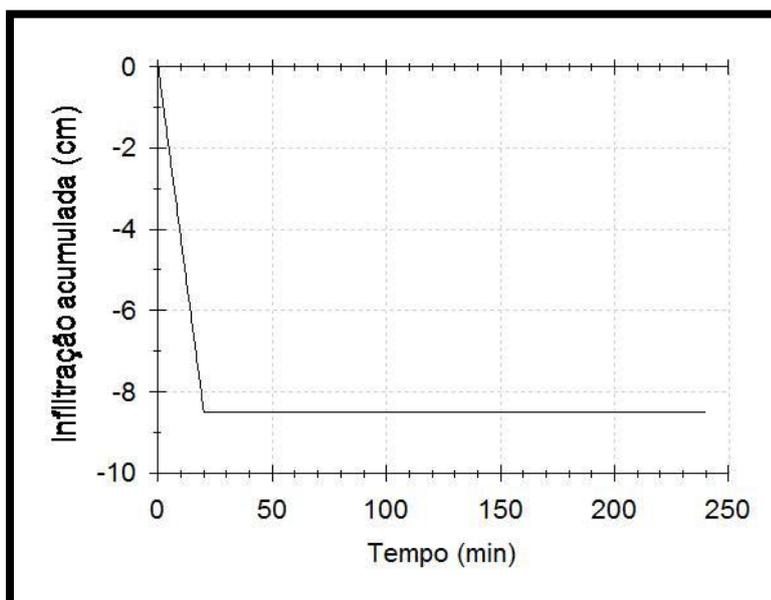


Figura 123 - Unidade 8 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

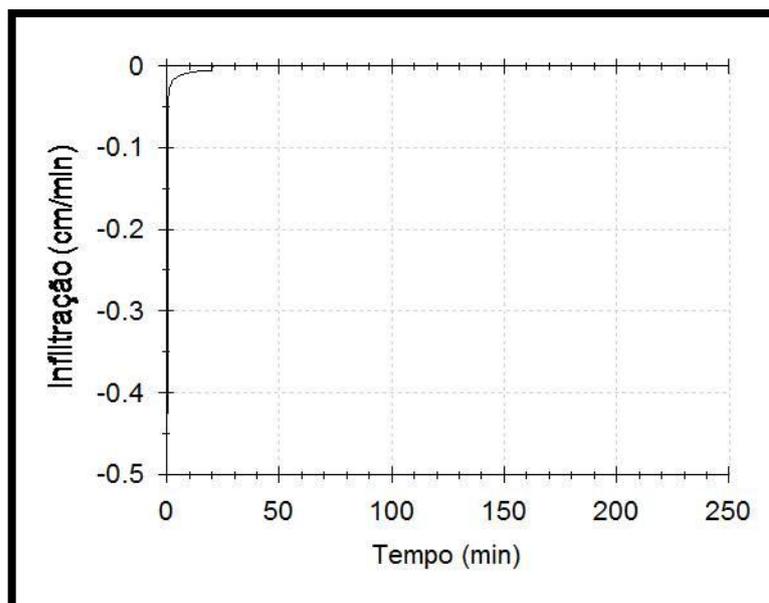


Figura 124 - Unidade 9 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

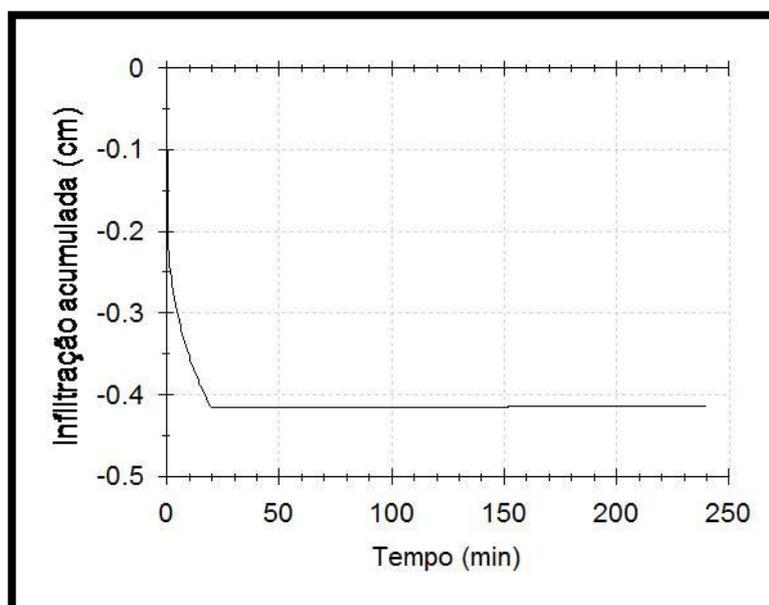


Figura 125 - Unidade 9 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

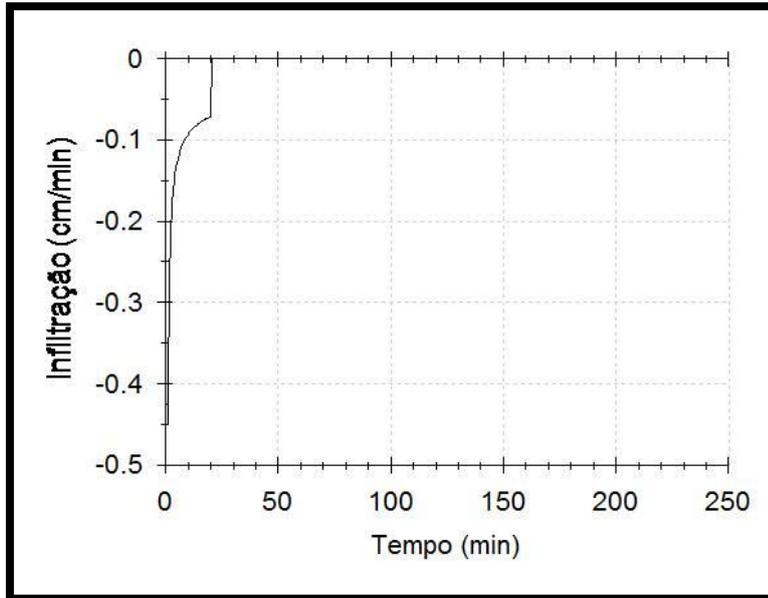


Figura 126 - Unidade 10 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

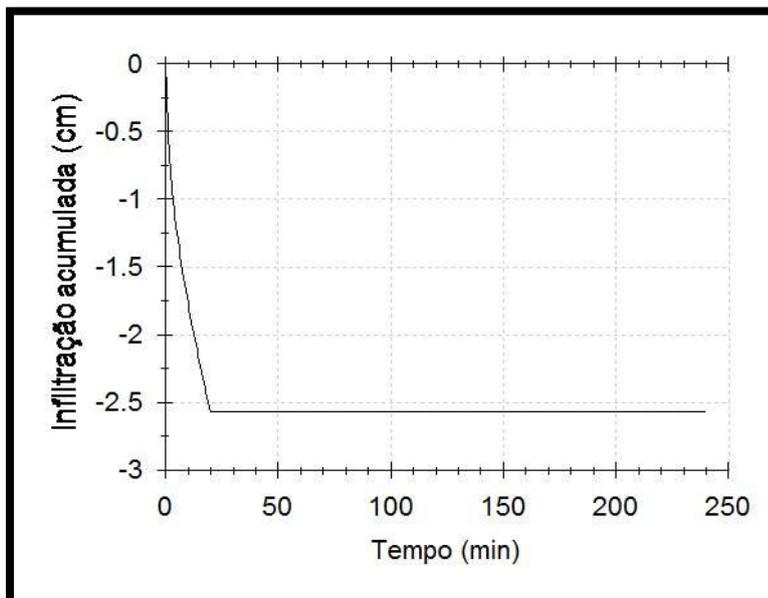


Figura 127 - Unidade 10 – evento de 5 de fevereiro de 2001.

**APÊNDICE IV – Gráficos de infiltração (cm/min) x tempo (min) e infiltração acumulada (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 13-14 de outubro de 1995.**

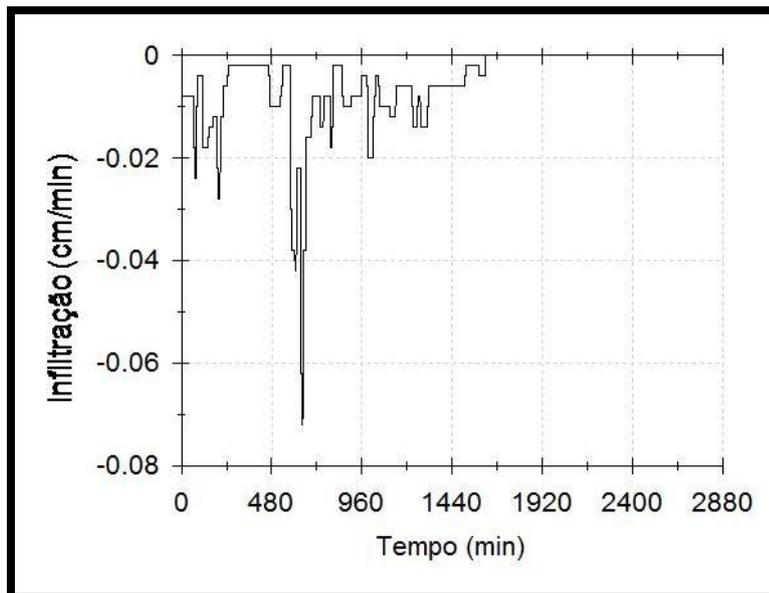


Figura 128 - Unidade 1 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

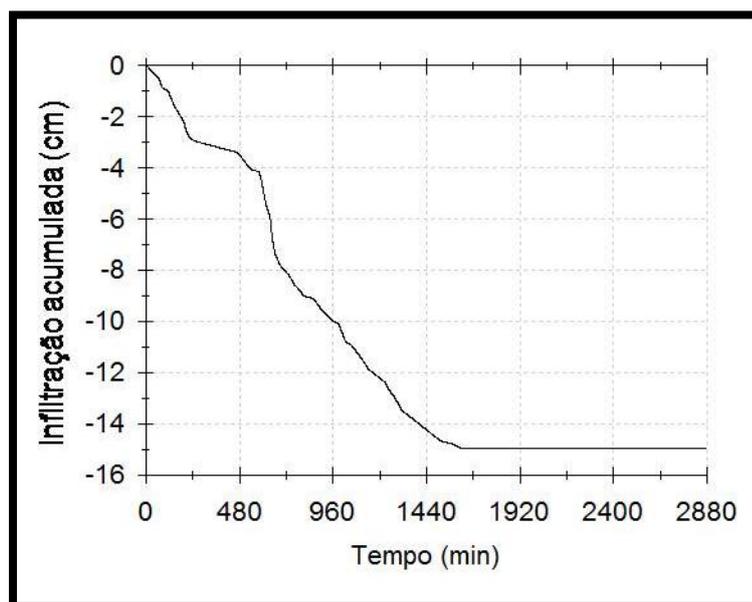


Figura 129 - Unidade 1 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

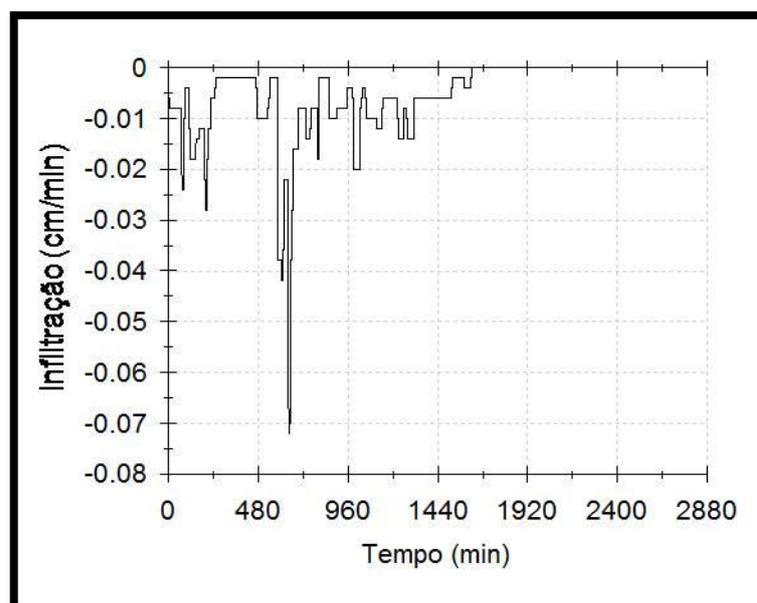


Figura 130 - Unidade 2 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

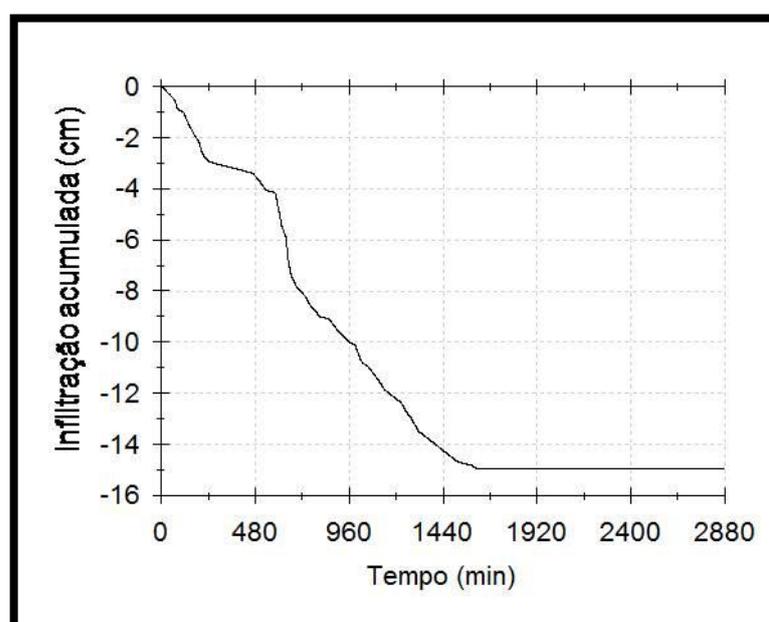


Figura 131 - Unidade 2 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

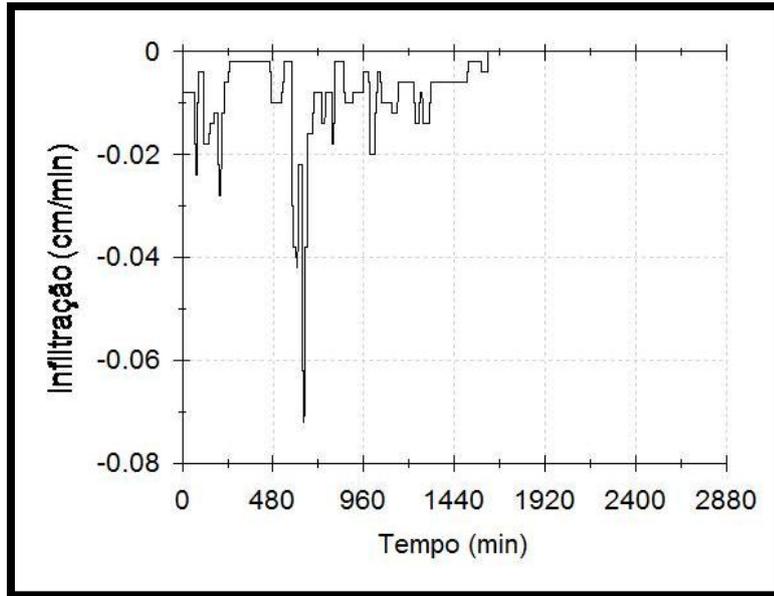


Figura 132 - Unidade 3 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

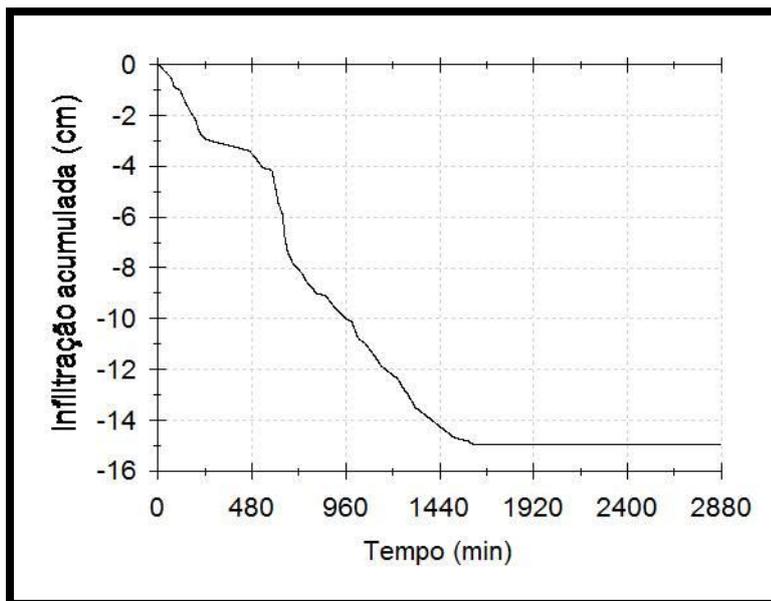


Figura 133 - Unidade 3 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

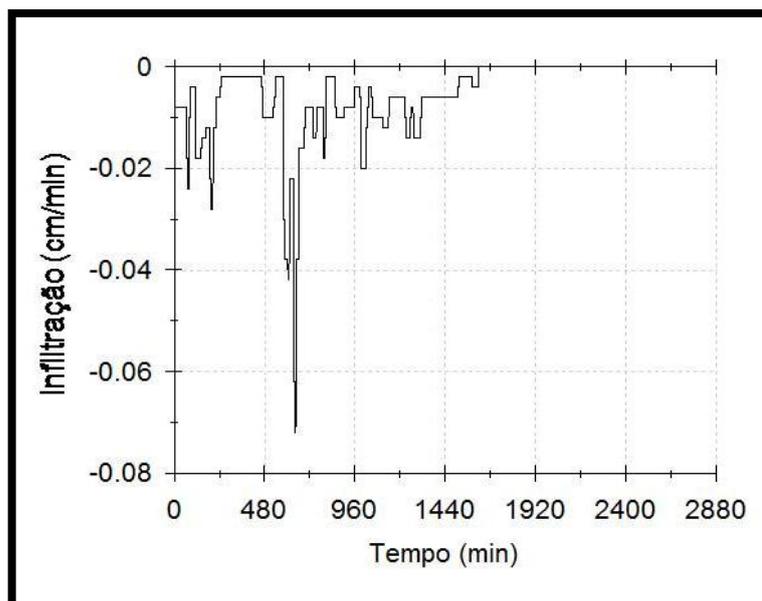


Figura 134 - Unidade 4 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

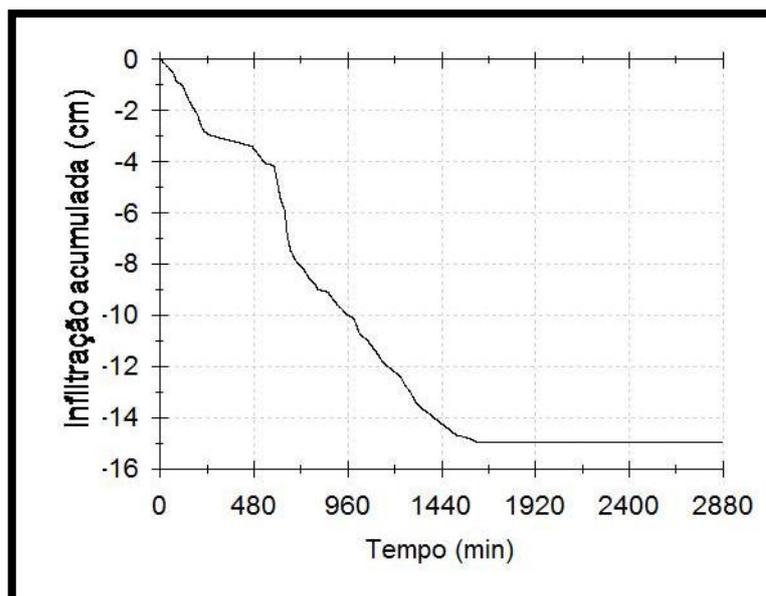


Figura 135 - Unidade 4 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

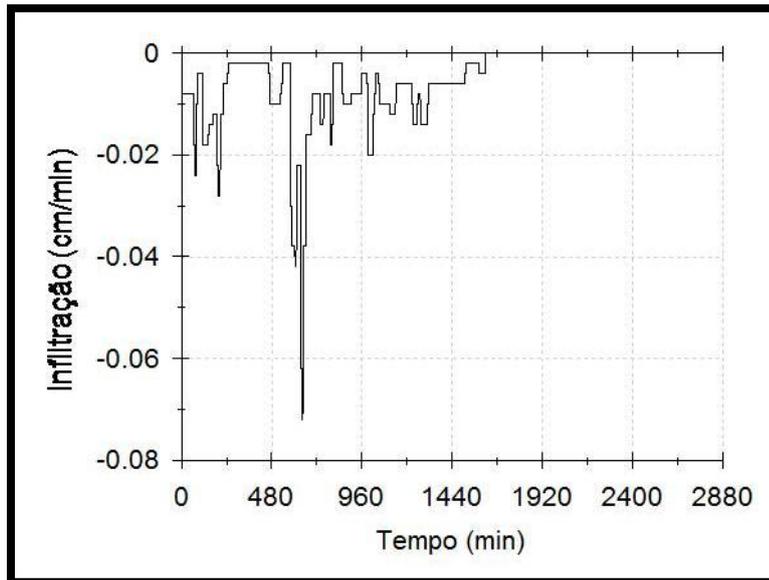


Figura 136 - Unidade 5a – evento de 13-14 de outubro de 1995.

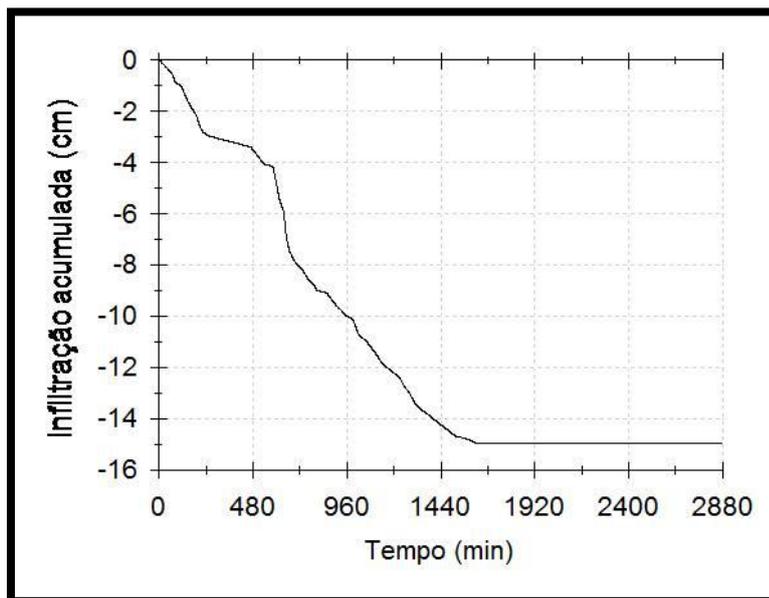


Figura 137 - Unidade 5a – evento de 13-14 de outubro de 1995.

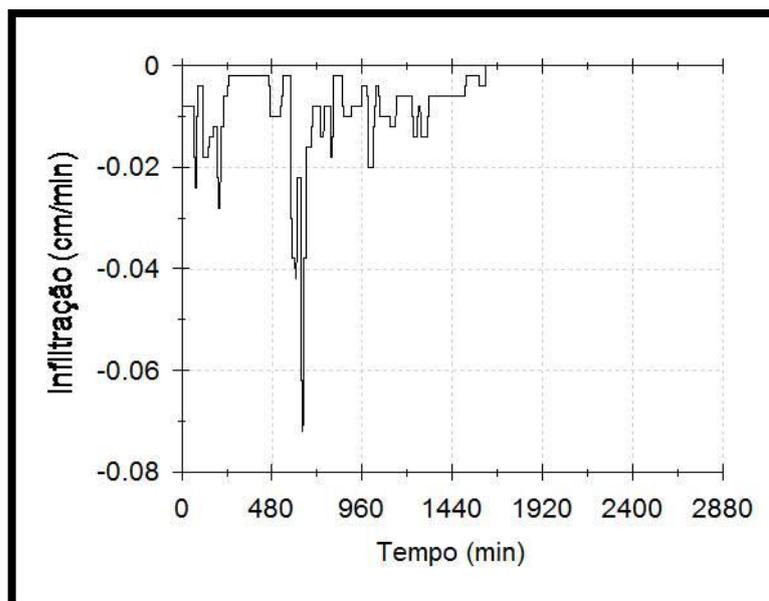


Figura 138 - Unidade 6 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

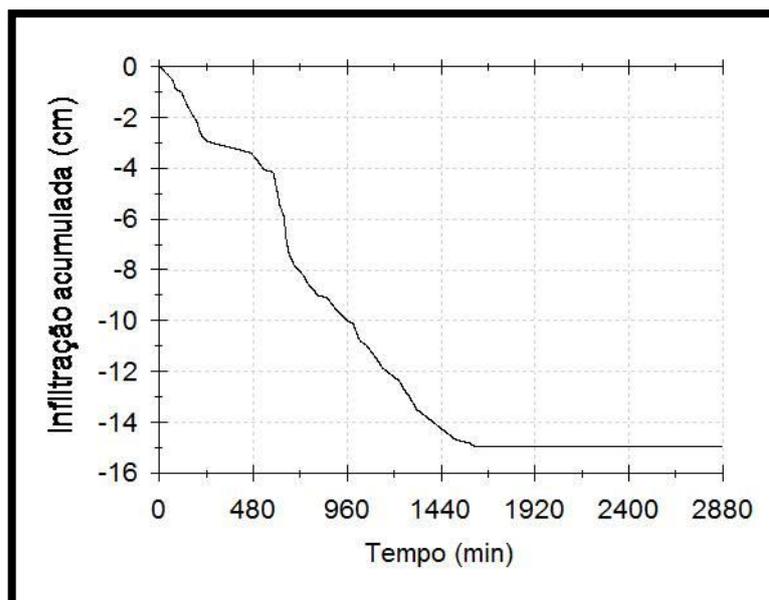


Figura 139 - Unidade 6 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

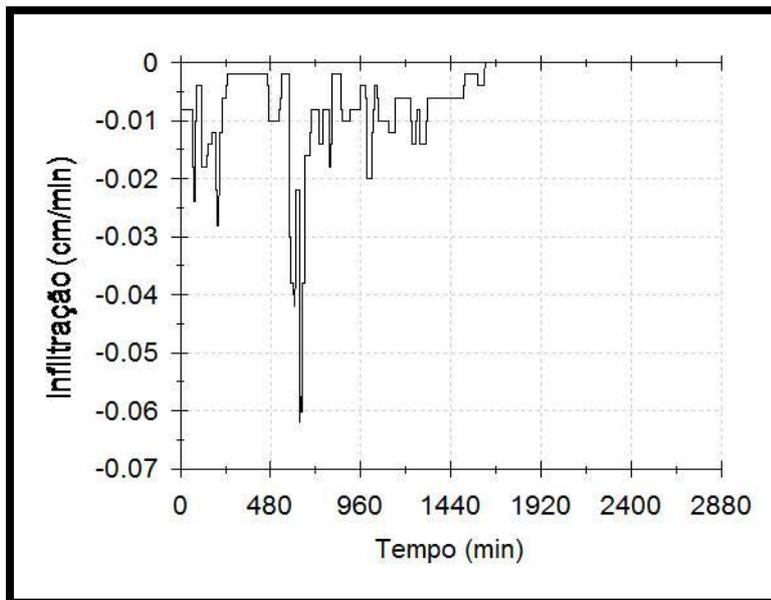


Figura 140 - Unidade 6a – evento de 13-14 de outubro de 1995.

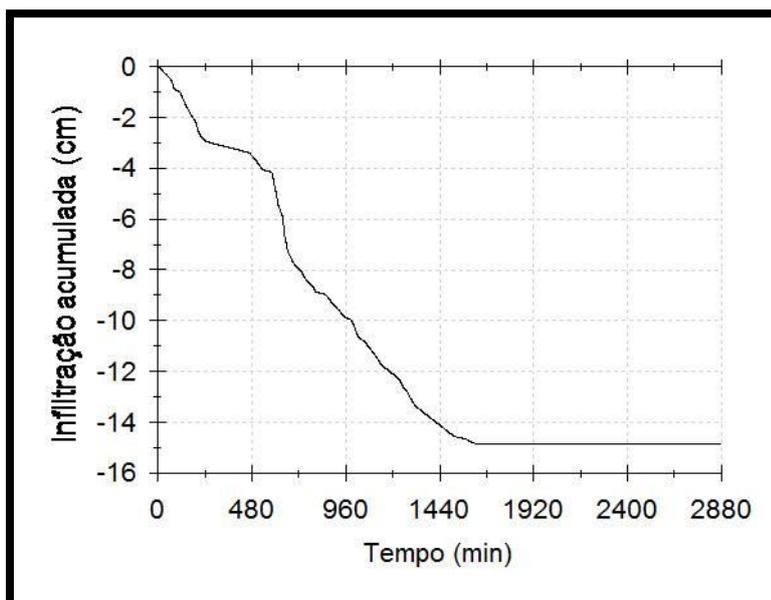


Figura 141 - Unidade 6a – evento de 13-14 de outubro de 1995.

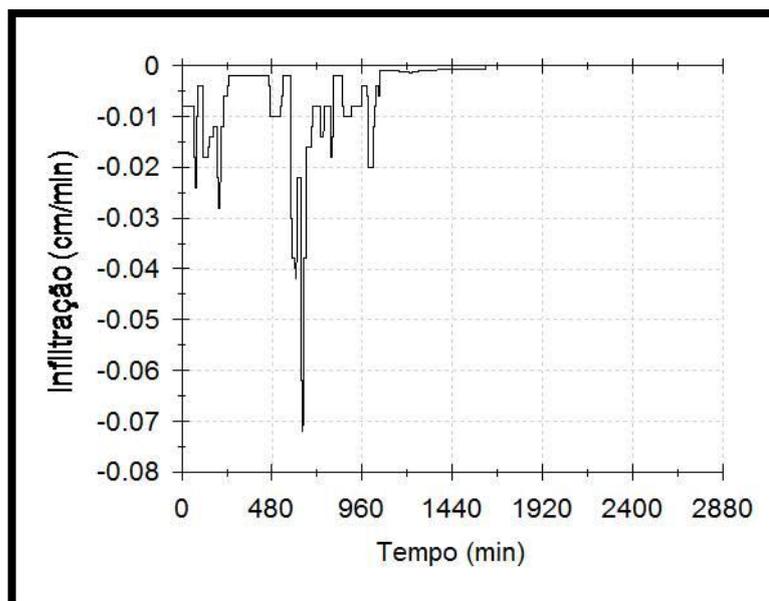


Figura 142 - Unidade 7 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

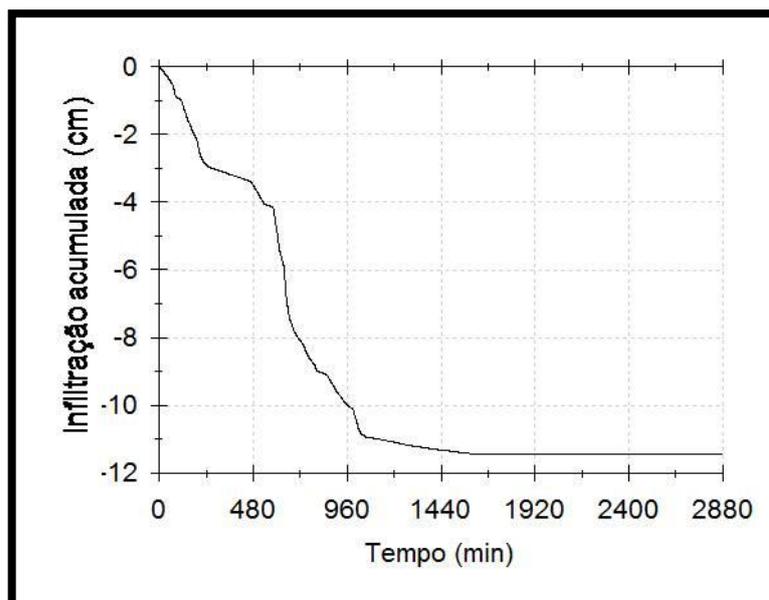


Figura 143 - Unidade 7 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

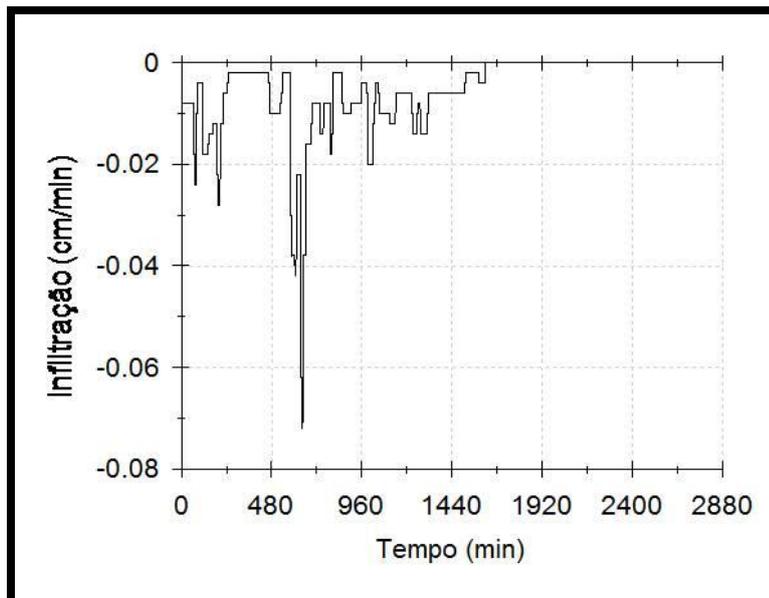


Figura 144 - Unidade 8 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

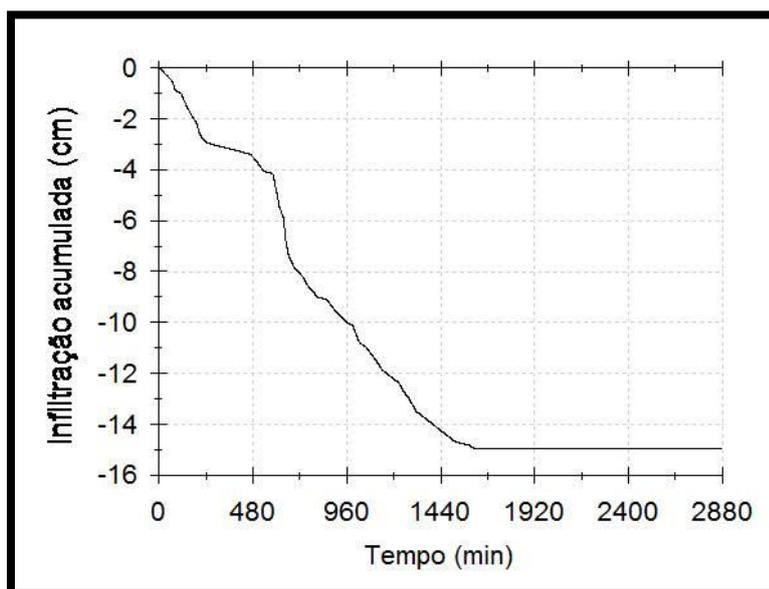


Figura 145 - Unidade 8 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

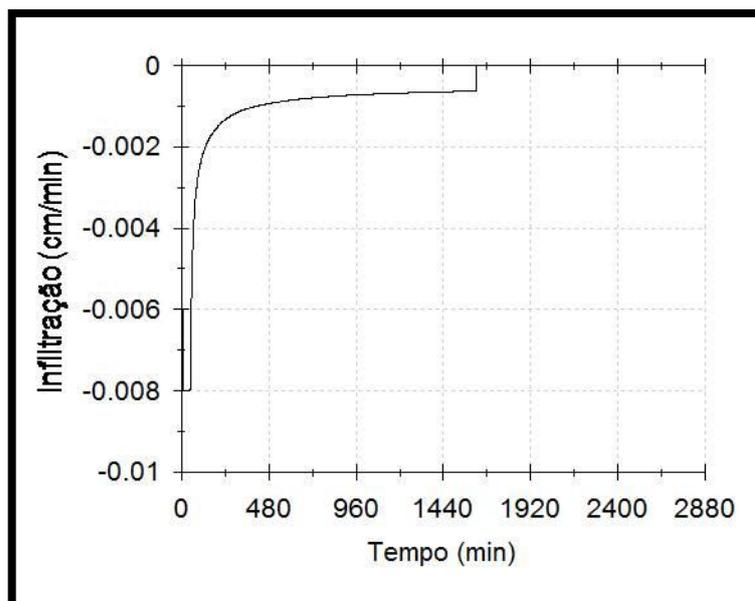


Figura 146 - Unidade 9 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

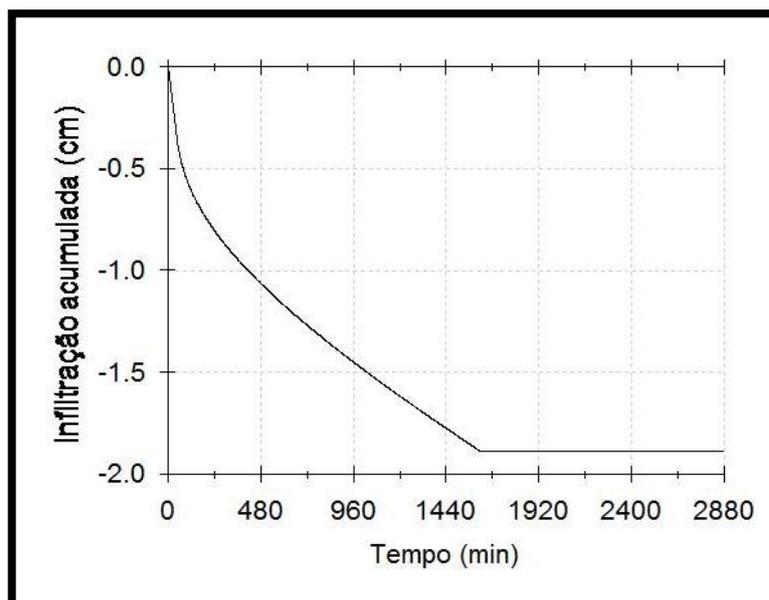


Figura 147 - Unidade 9 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

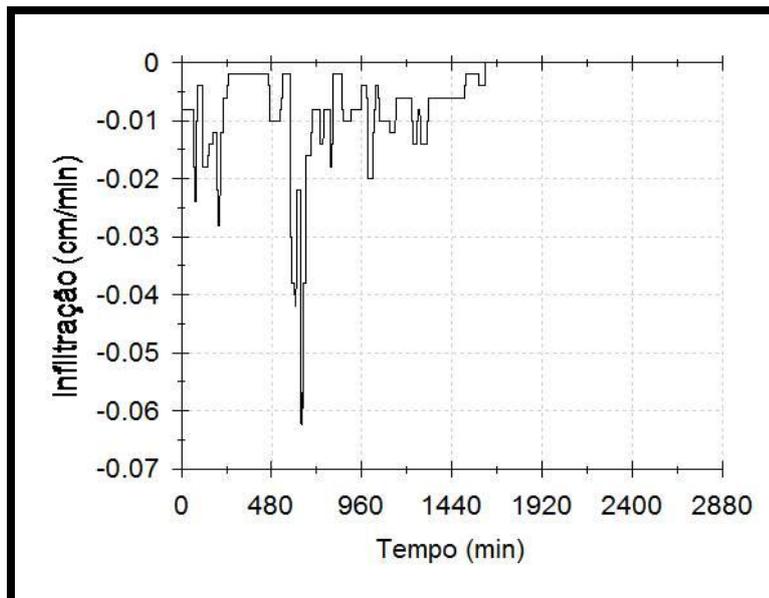


Figura 148 - Unidade 10 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

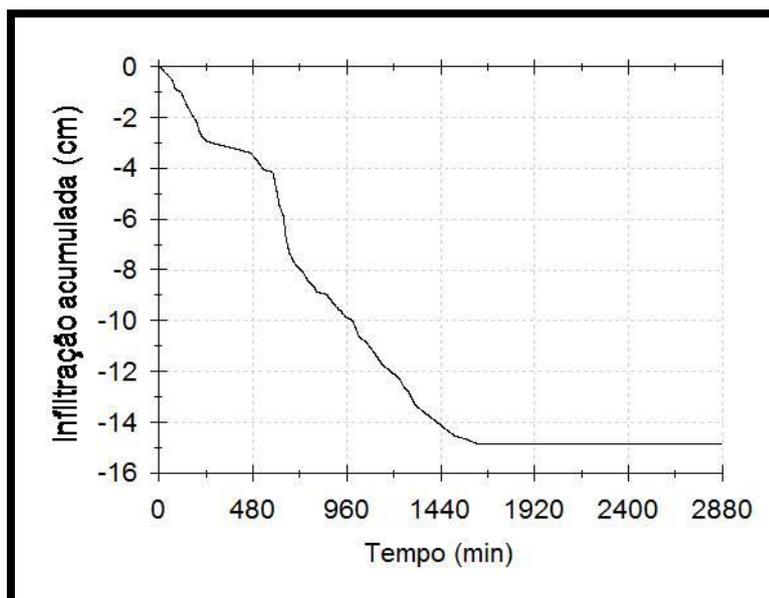


Figura 149 - Unidade 10 – evento de 13-14 de outubro de 1995.

**APÊNDICE V – Gráficos de tensão de sucção (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 5 de fevereiro de 2001.**

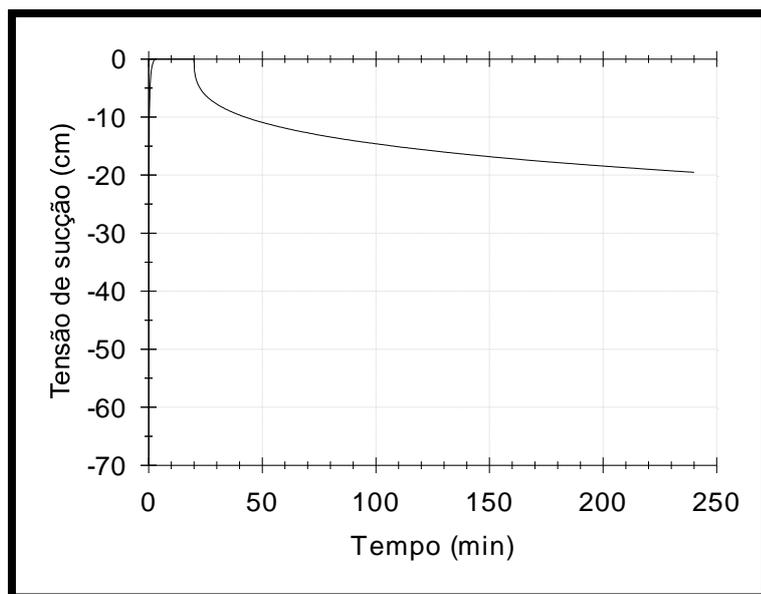


Figura 150 - Unidade 1 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

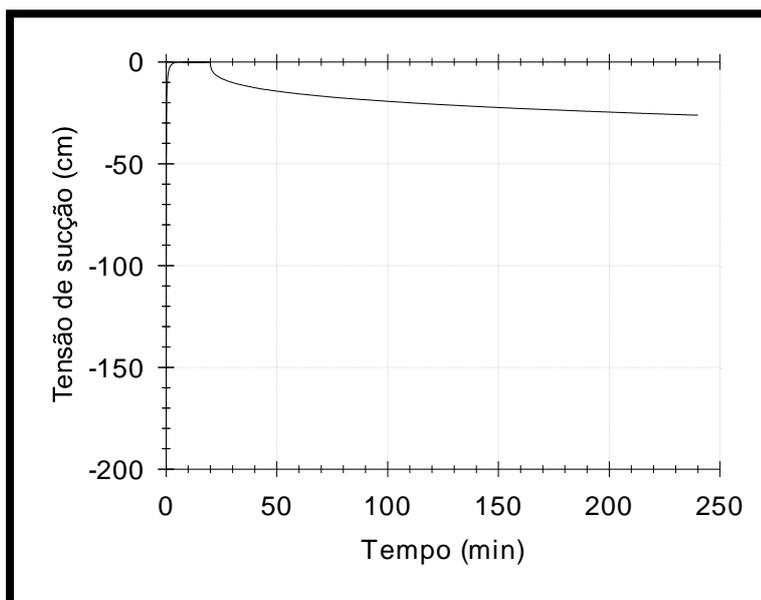


Figura 151 - Unidade 2 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

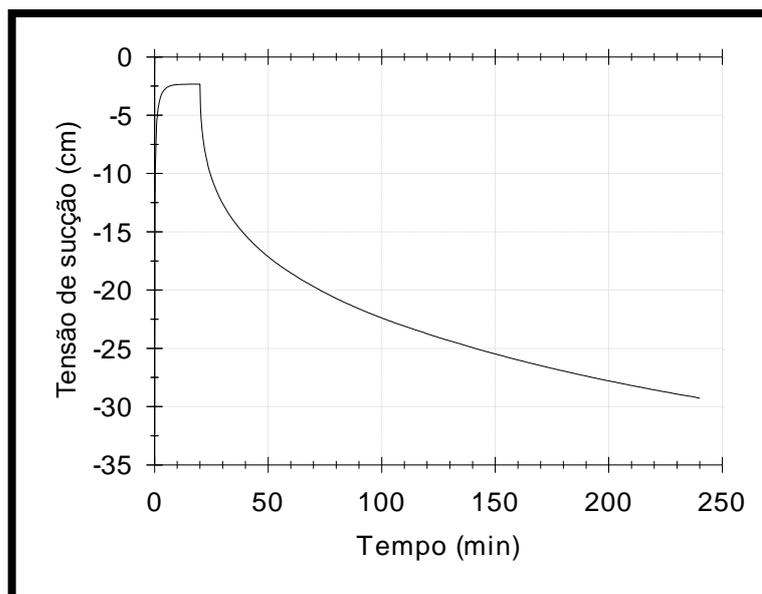


Figura 152 - Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

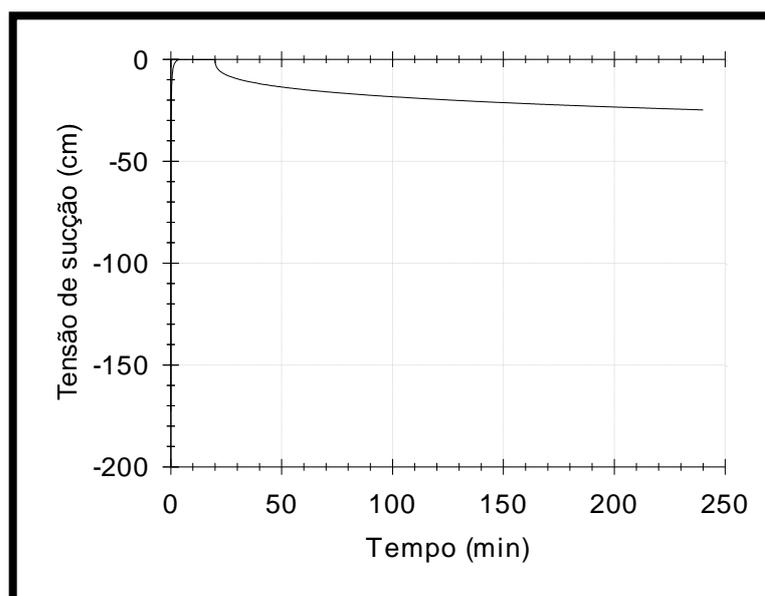


Figura 153 - Unidade 4 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

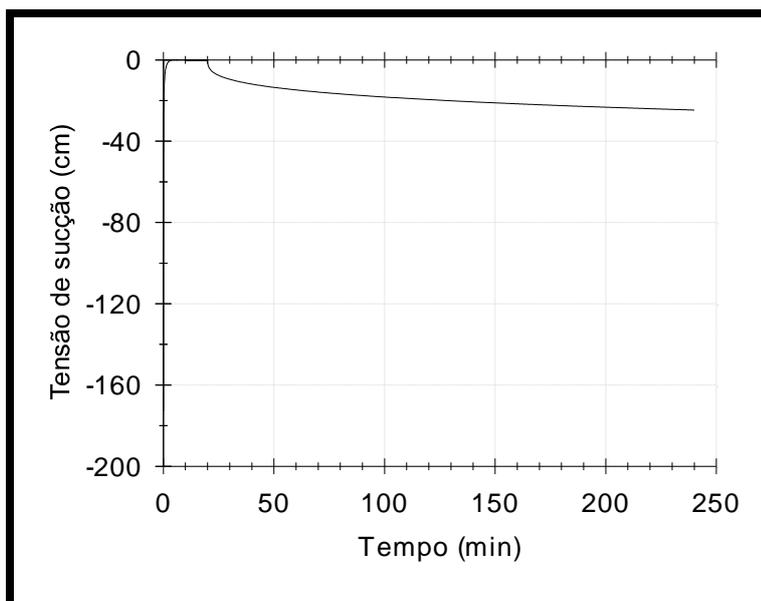


Figura 154 - Unidade 5a - evento de 5 de fevereiro de 2001.

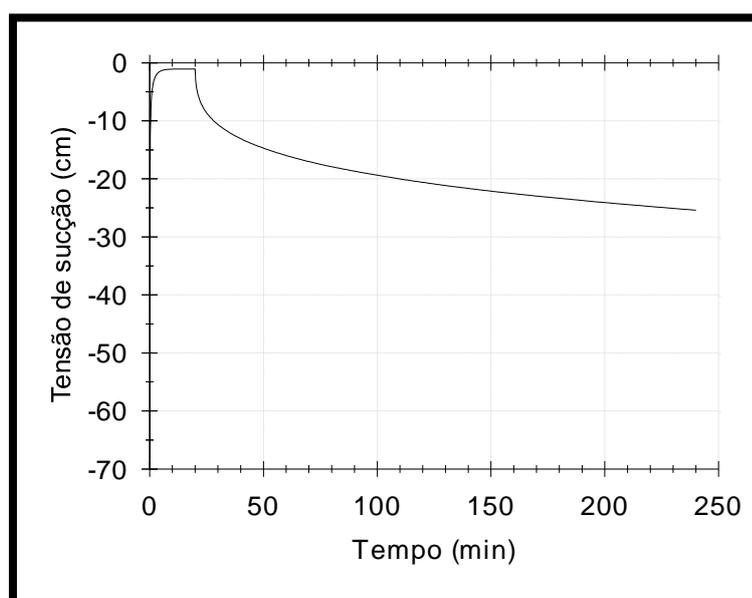


Figura 155 - Unidade 6 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

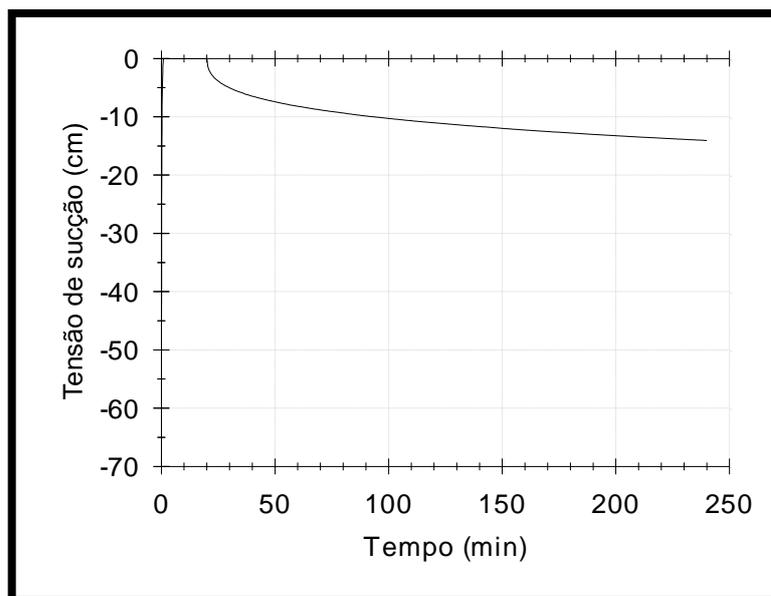


Figura 156 - Unidade 6a - evento de 5 de fevereiro de 2001.

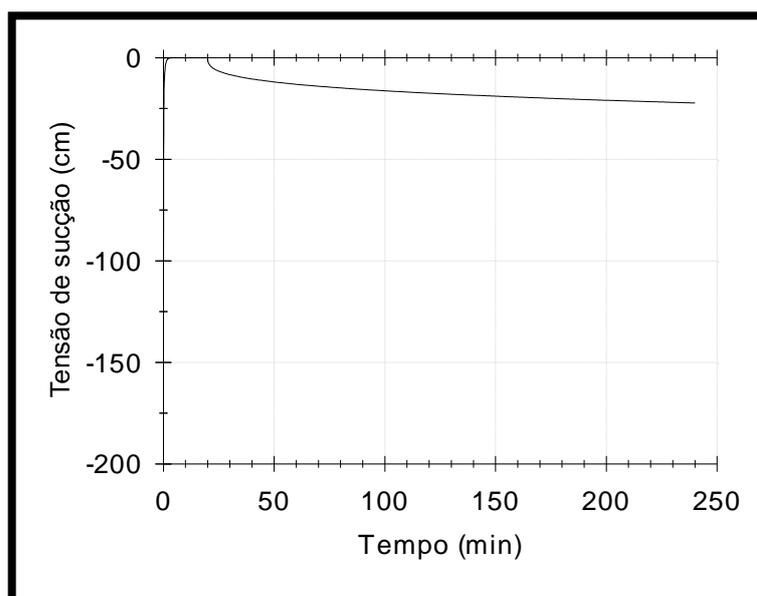


Figura 157 - Unidade 7 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

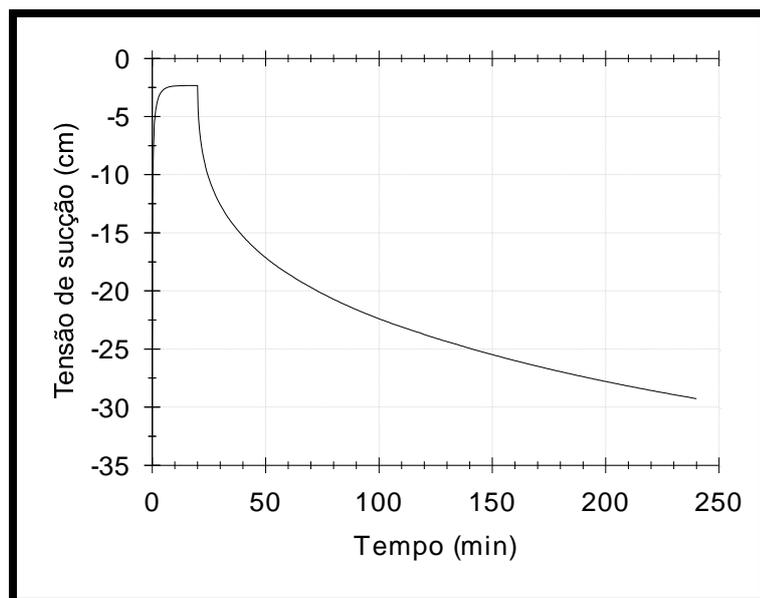


Figura 158 - Unidade 8 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

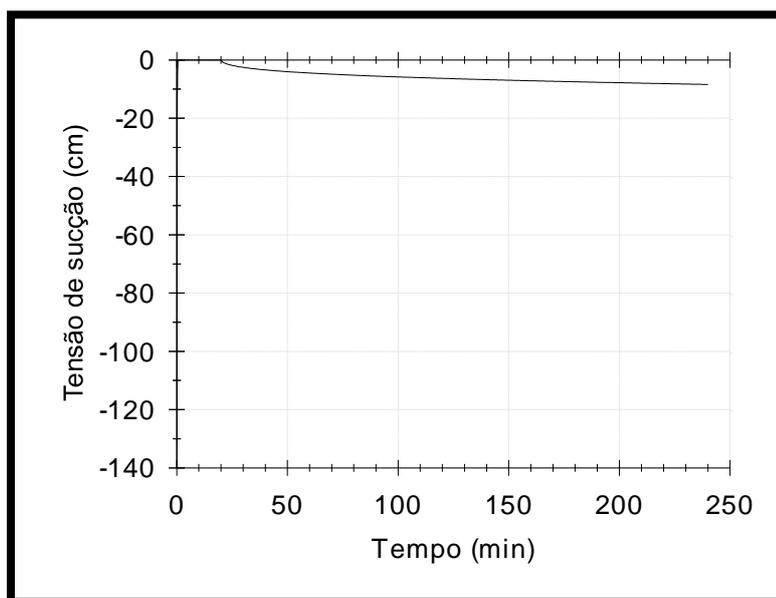


Figura 159 - Unidade 9 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

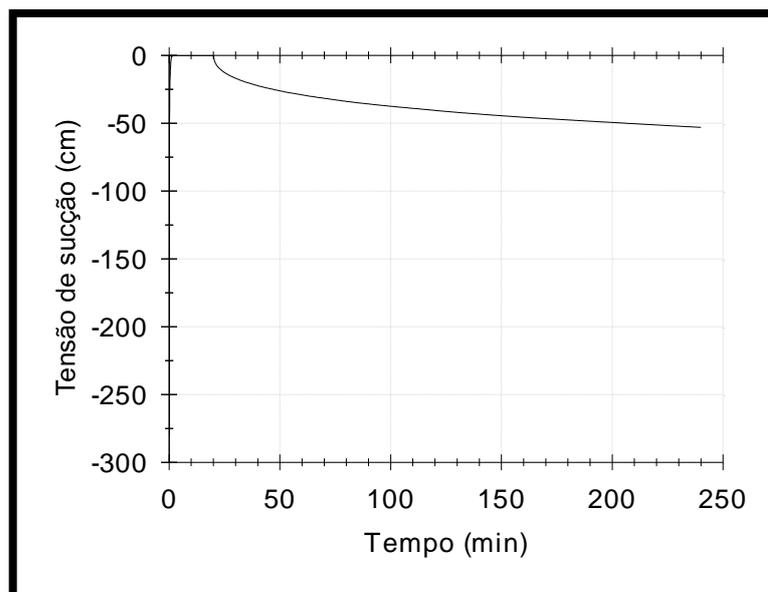


Figura 160 - Unidade 10 - evento de 5 de fevereiro de 2001.



**APÊNDICE VI – Gráficos de tensão de sucção (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 13-14 de outubro de 1995.**

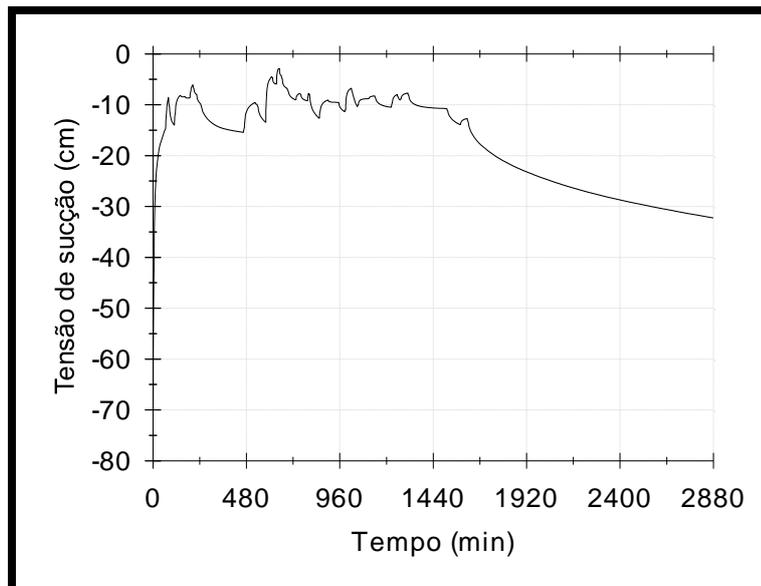


Figura 161 - Unidade 1 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

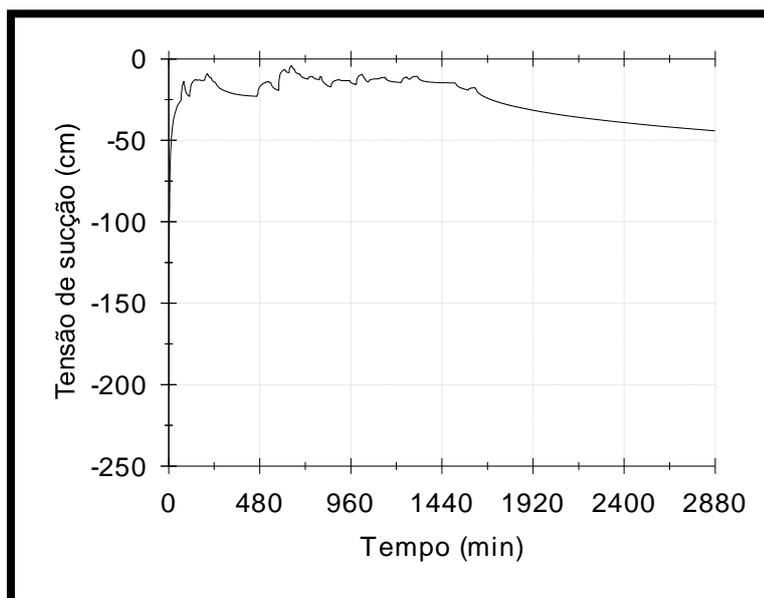


Figura 162 - Unidade 2 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

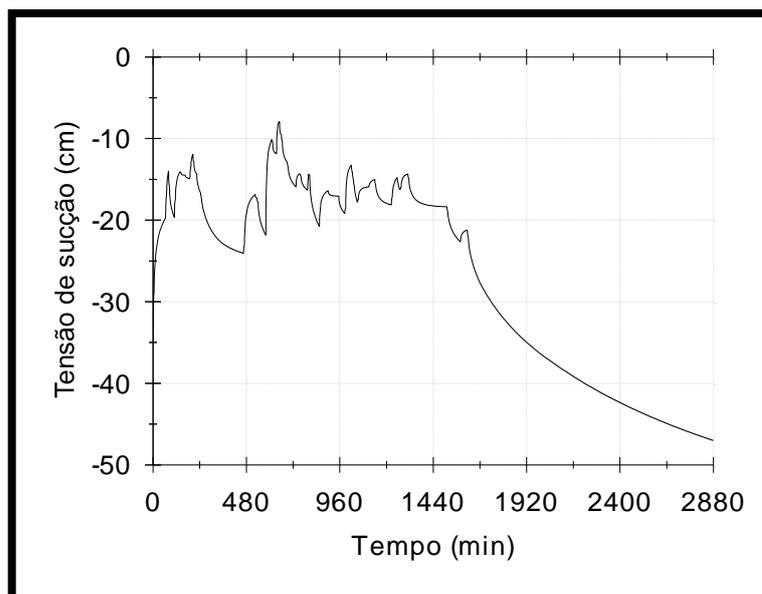


Figura 163 - Unidade 3 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

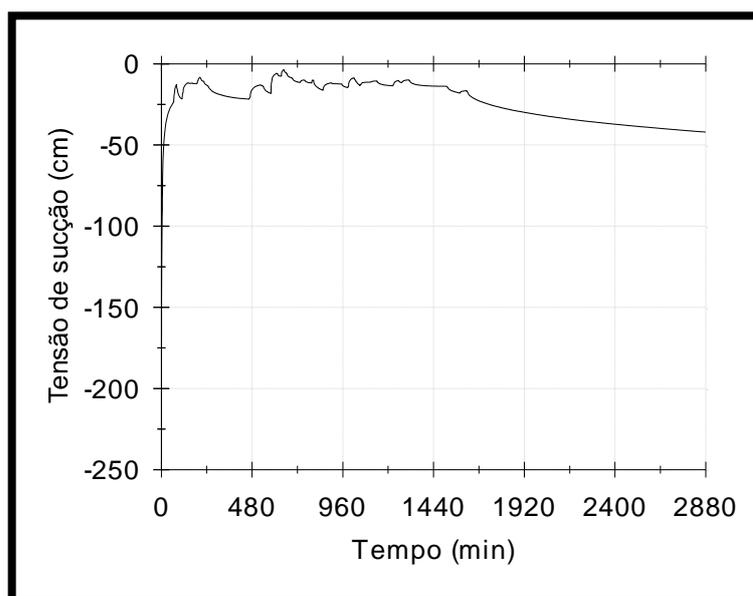


Figura 164 - Unidade 4 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

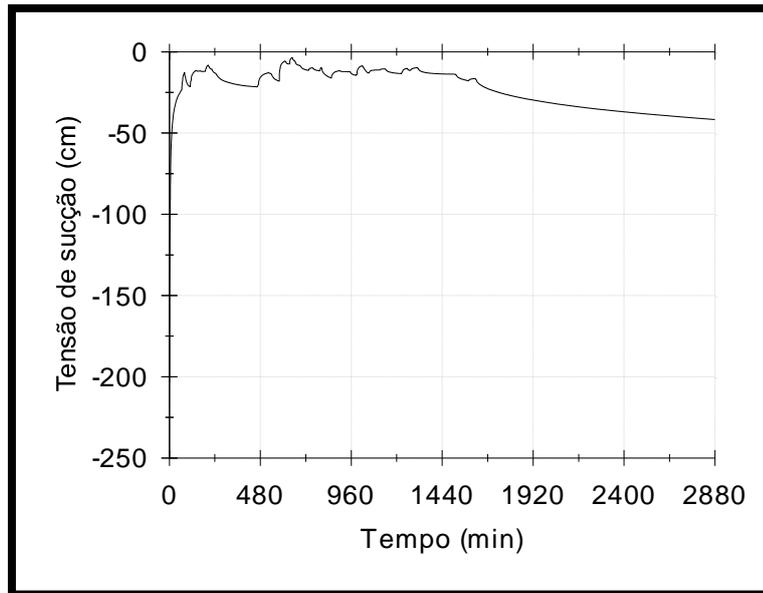


Figura 165 - Unidade 5a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

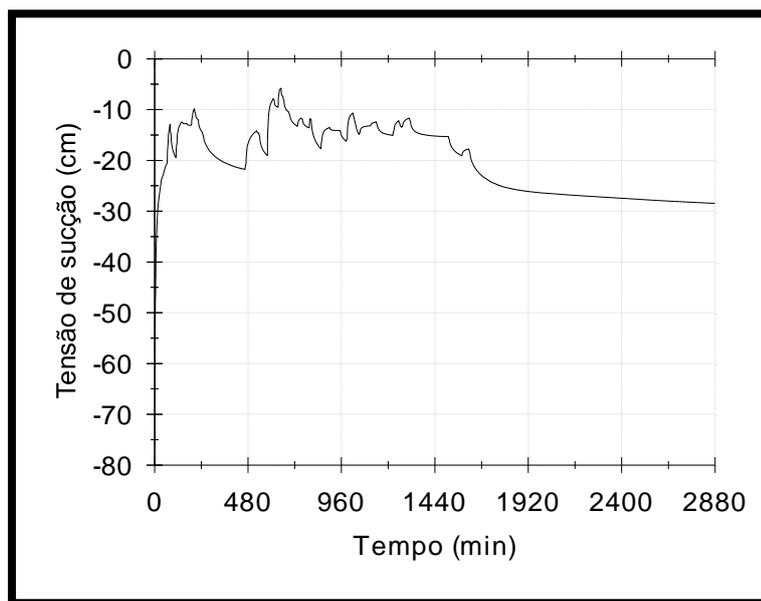


Figura 166 - Unidade 6 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

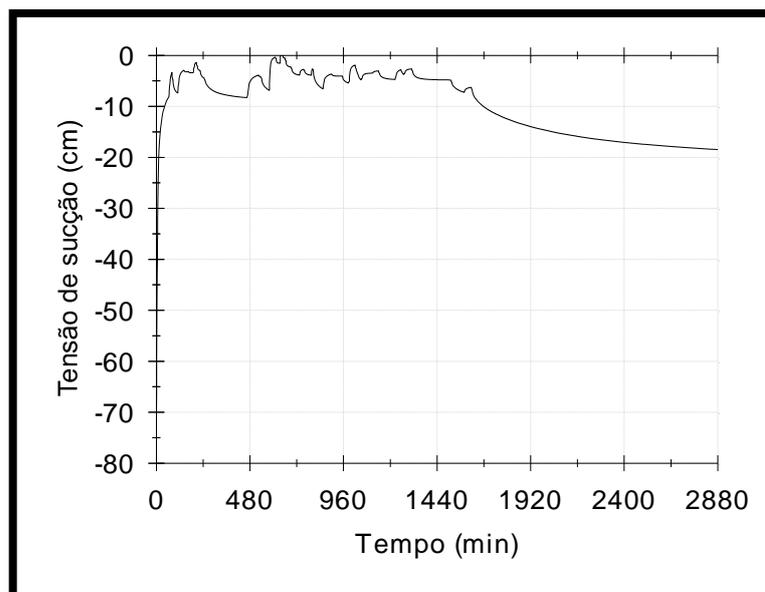


Figura 167 - Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

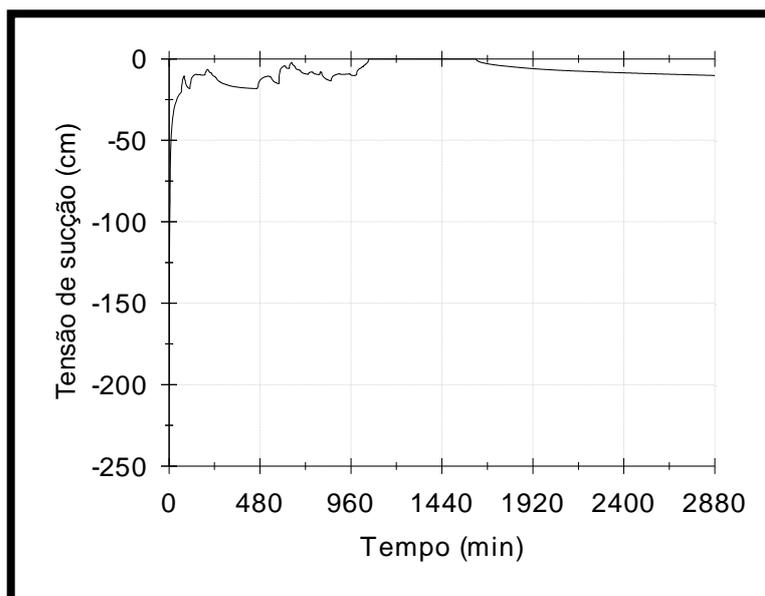


Figura 168 - Unidade 7 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

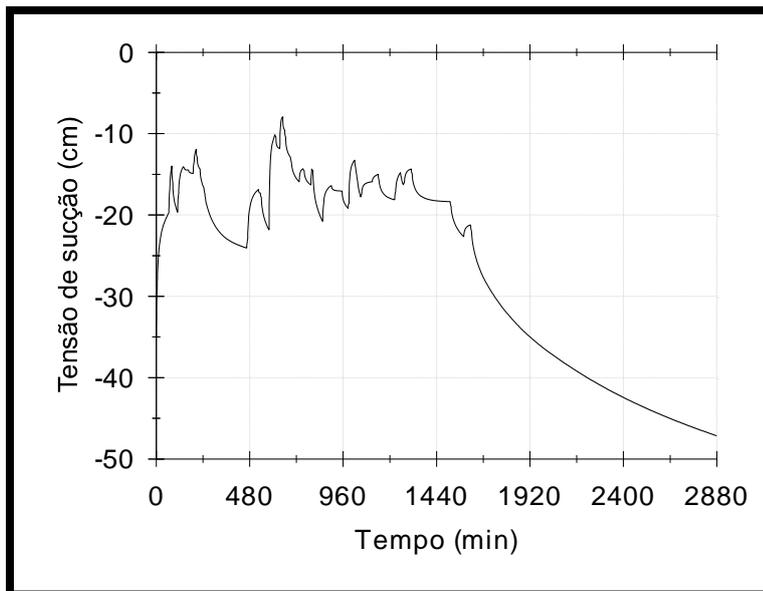


Figura 169 - Unidade 8 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

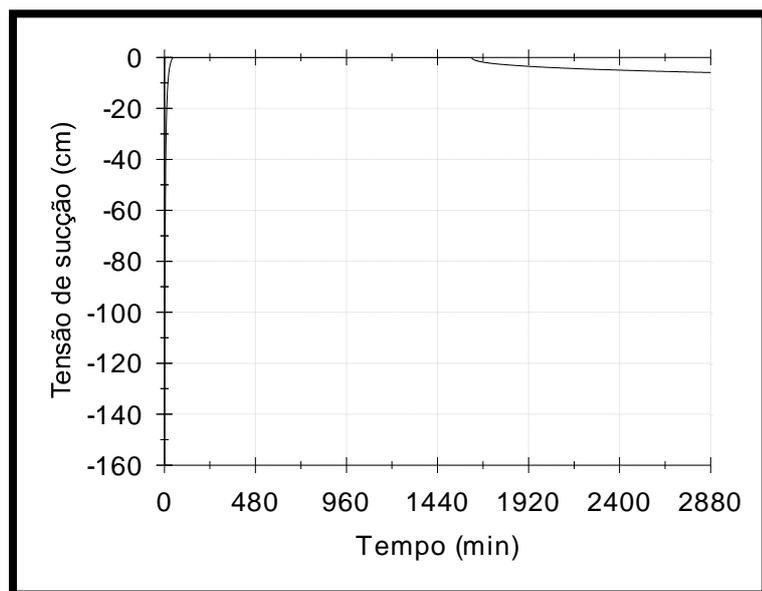


Figura 170 - Unidade 9 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

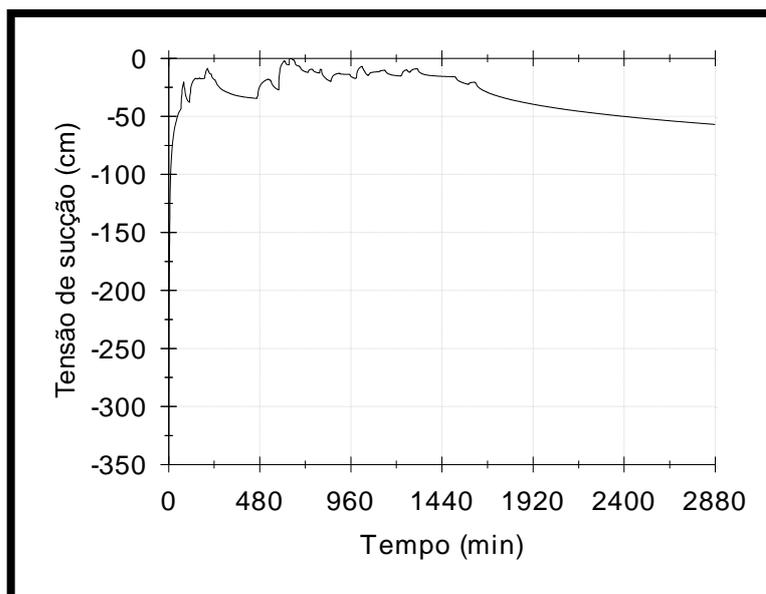


Figura 171 - Unidade 10 - evento de 13-14 de outubro de 1995.



**APÊNDICE VII – Gráficos de fluxo *run-off* (cm/min) x tempo (min) e fluxo *run-off* acumulado (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 5 de fevereiro de 2001.**

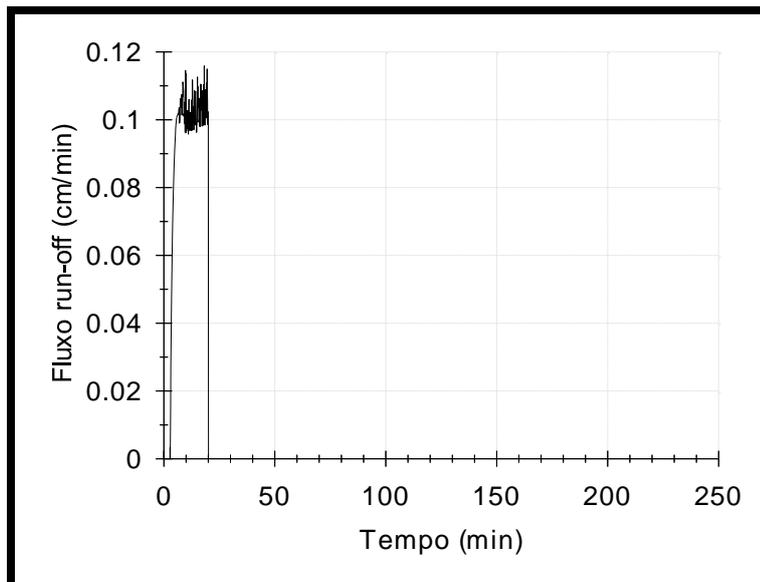


Figura 172 - Unidade 1 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

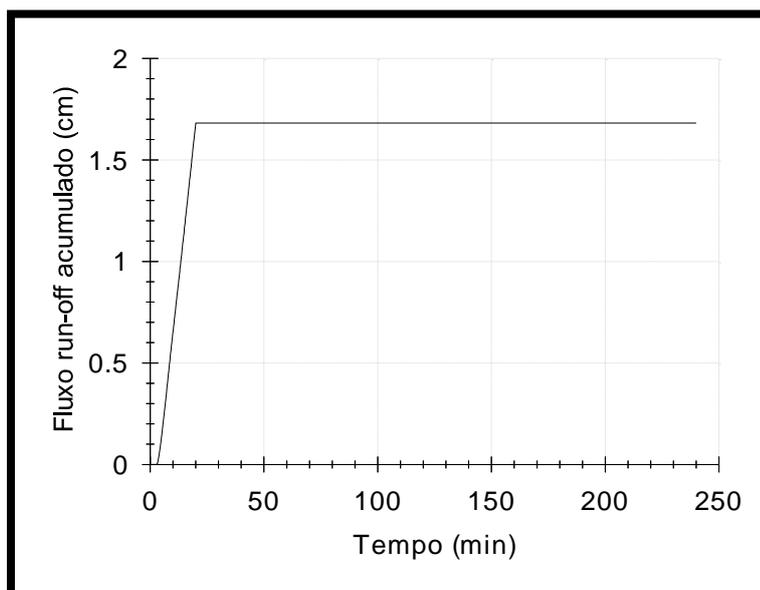


Figura 173 - Unidade 1 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

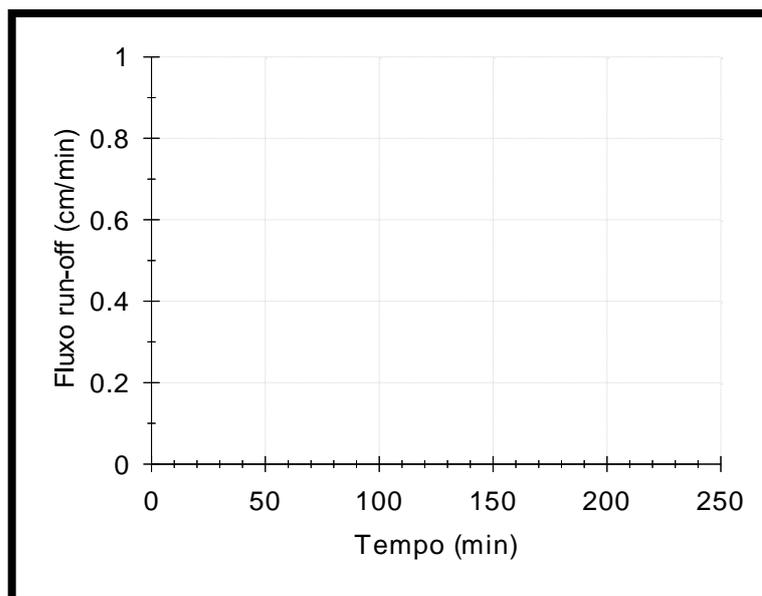


Figura 174 - Unidade 2 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

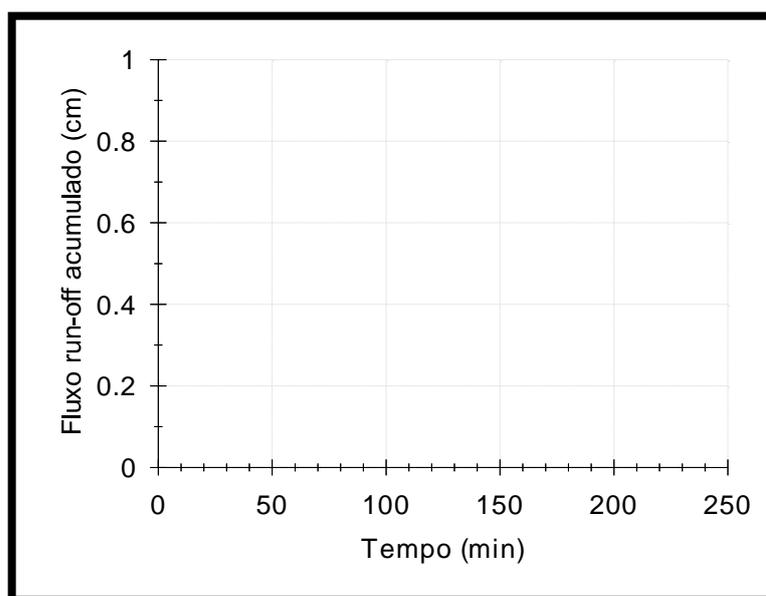


Figura 175 - Unidade 2 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

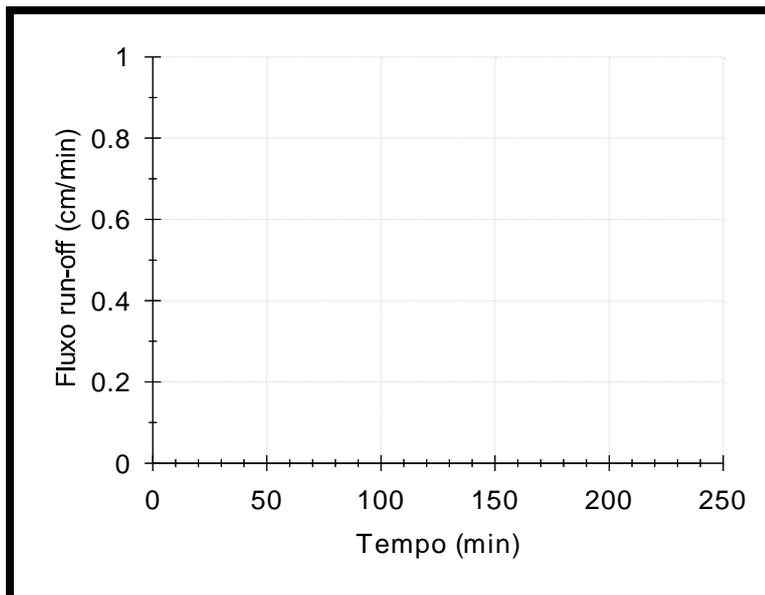


Figura 176 - Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

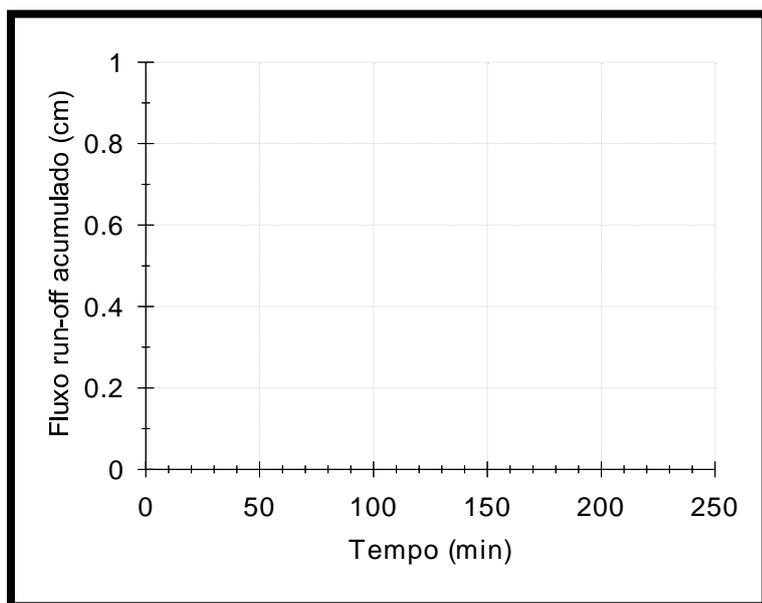


Figura 177 - Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

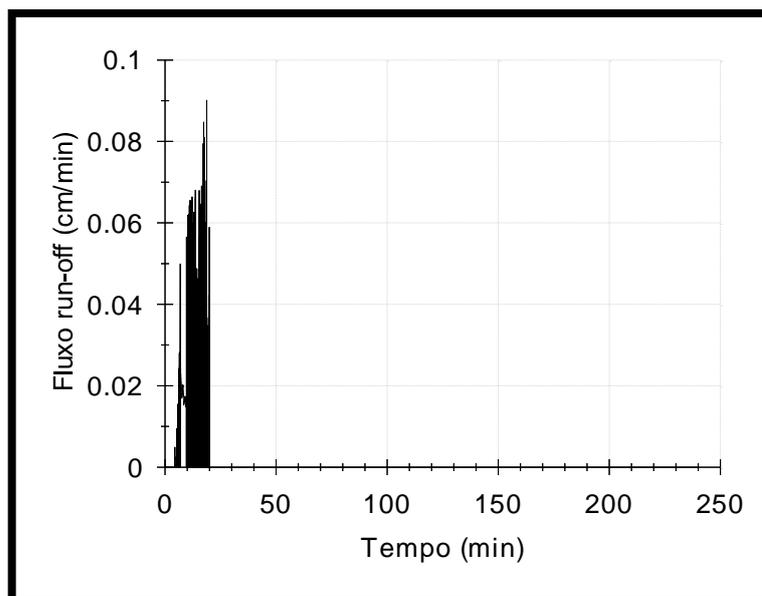


Figura 178 - Unidade 4 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

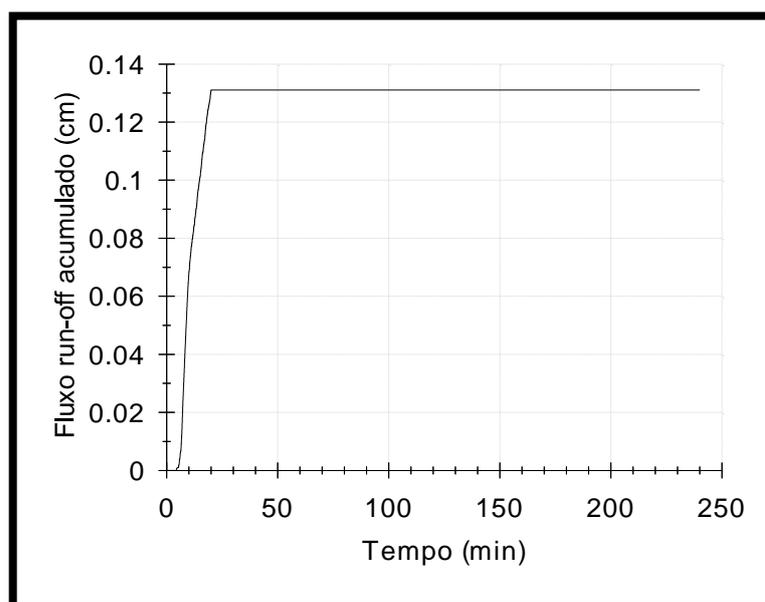


Figura 179 - Unidade 4 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

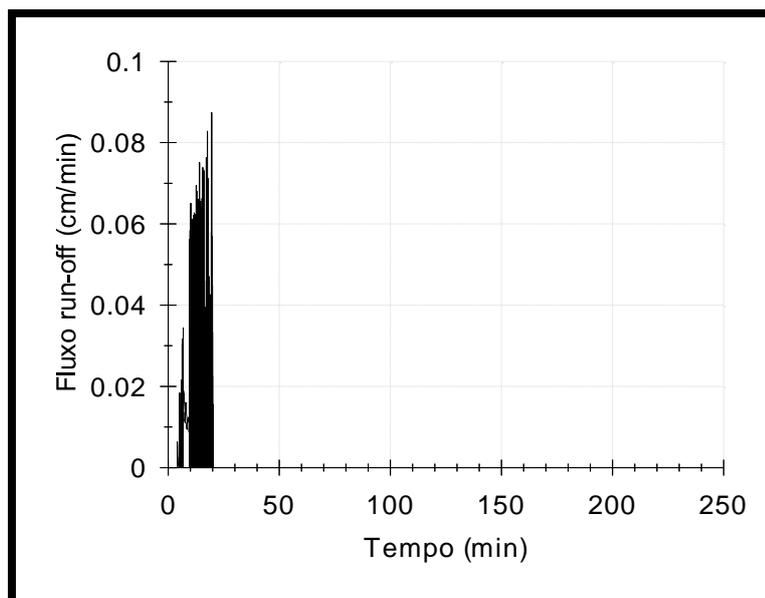


Figura 180 - Unidade 5a - evento de 5 de fevereiro de 2001.

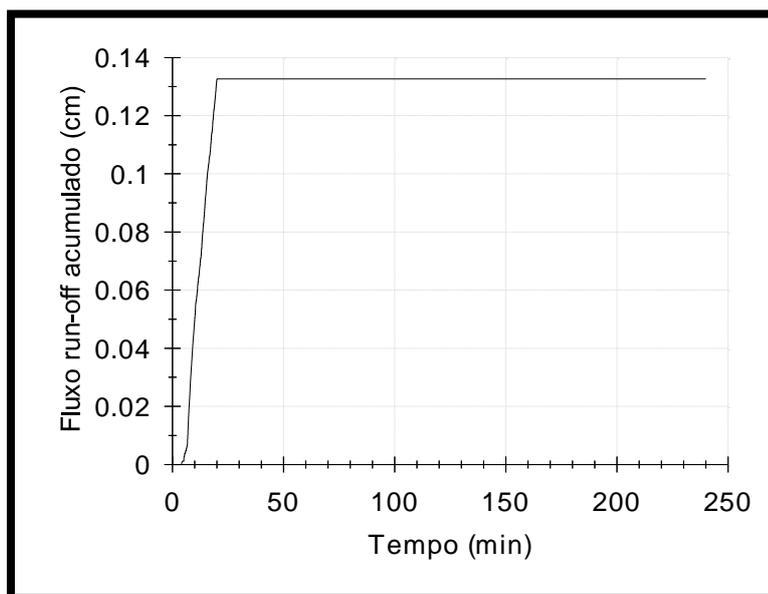


Figura 181 - Unidade 5a - evento de 5 de fevereiro de 2001.

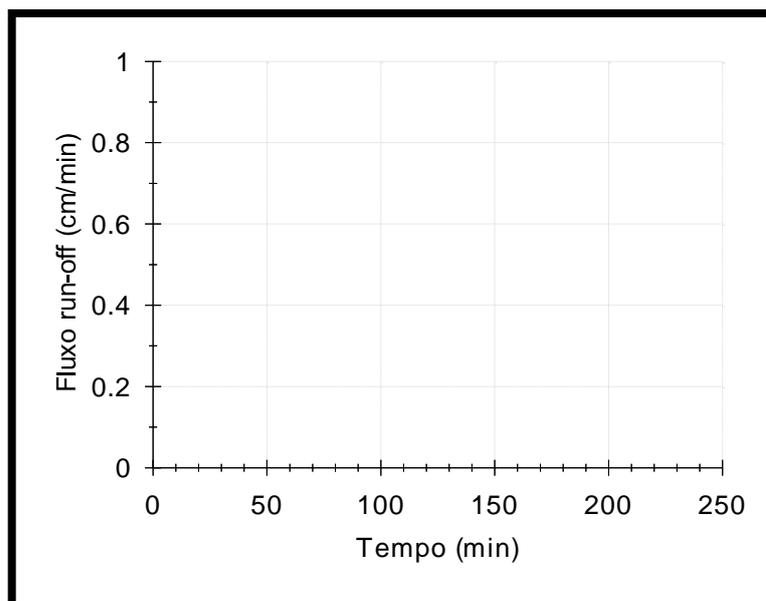


Figura 182 - Unidade 6 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

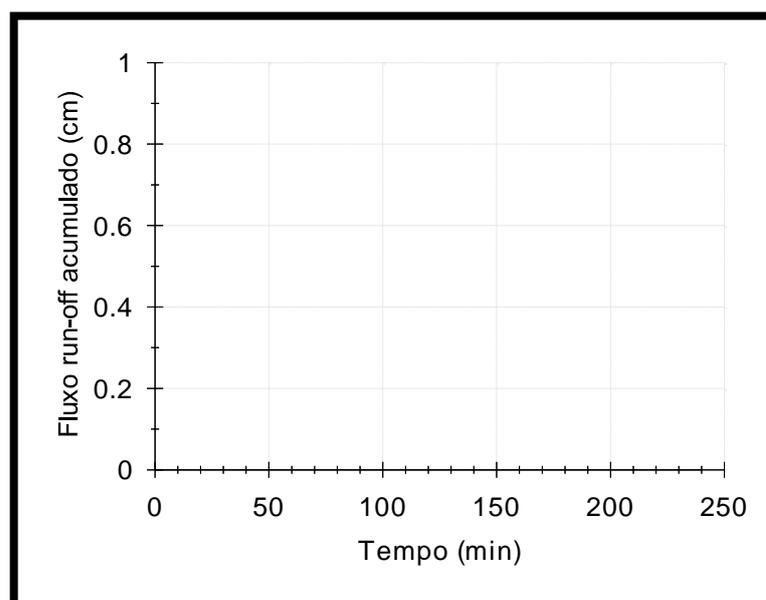


Figura 183 - Unidade 6 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

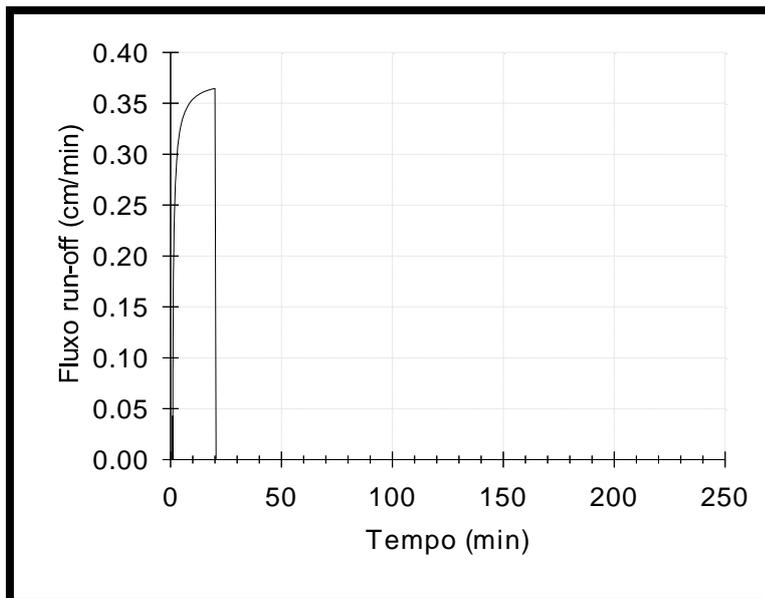


Figura 184 - Unidade 6a - evento de 5 de fevereiro de 2001.

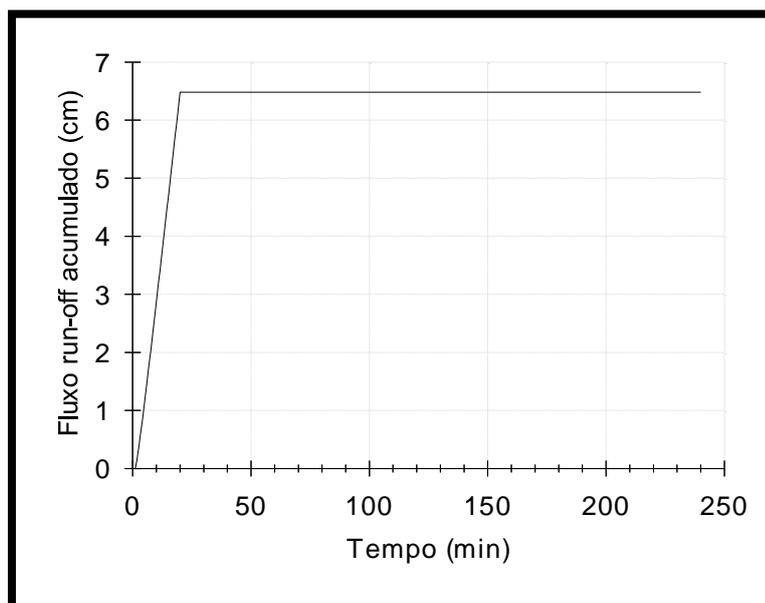


Figura 185 - Unidade 6a - evento de 5 de fevereiro de 2001.

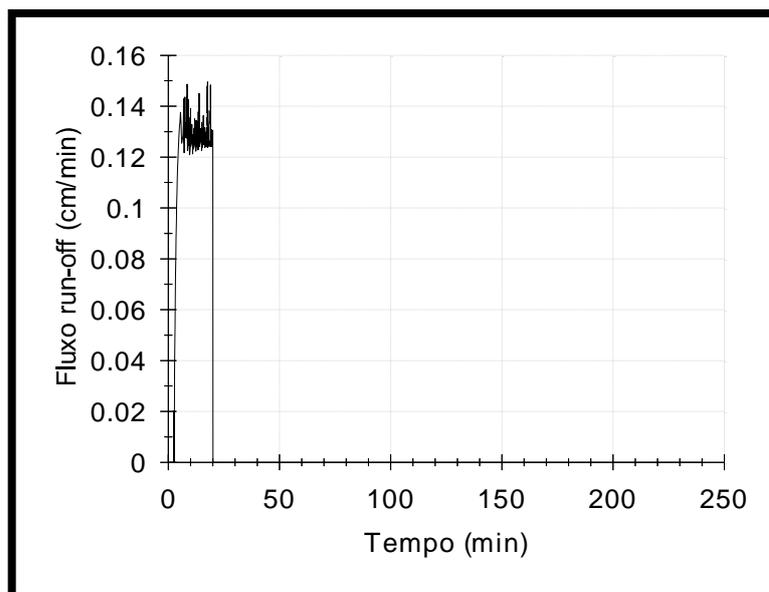


Figura 186 - Unidade 7 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

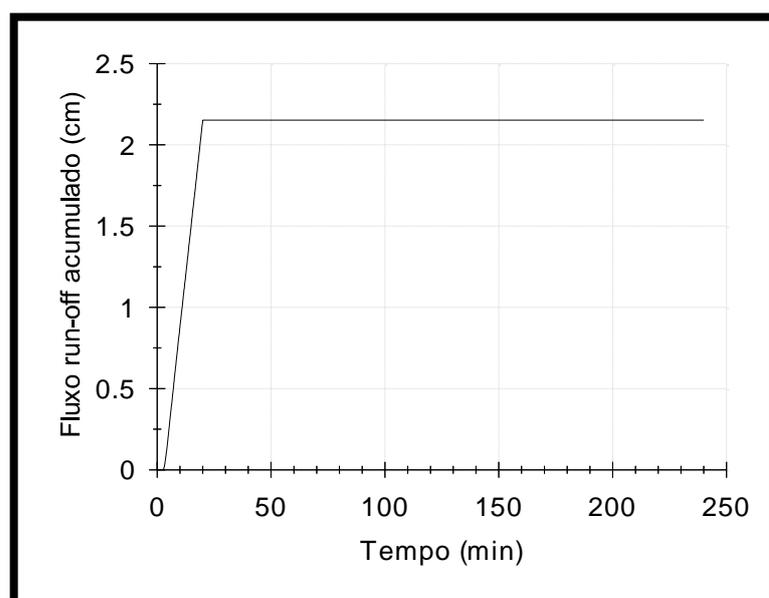


Figura 187 - Unidade 7 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

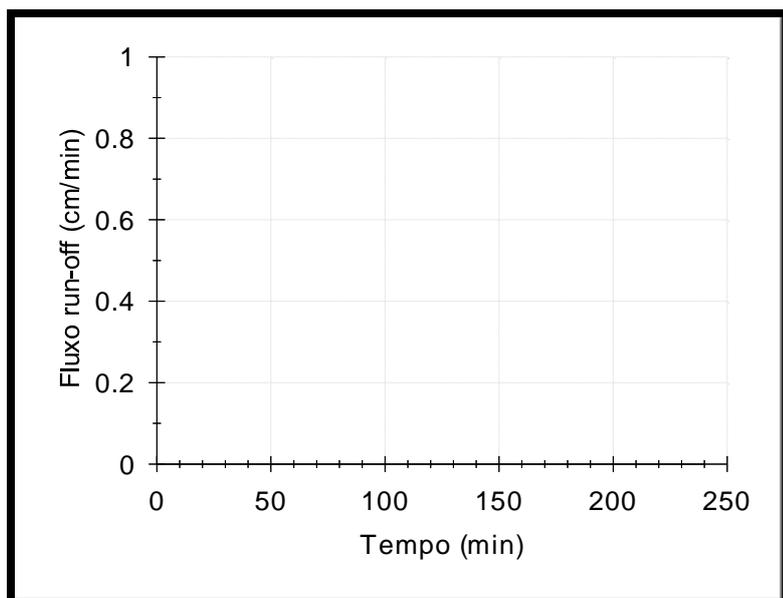


Figura 188 - Unidade 8 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

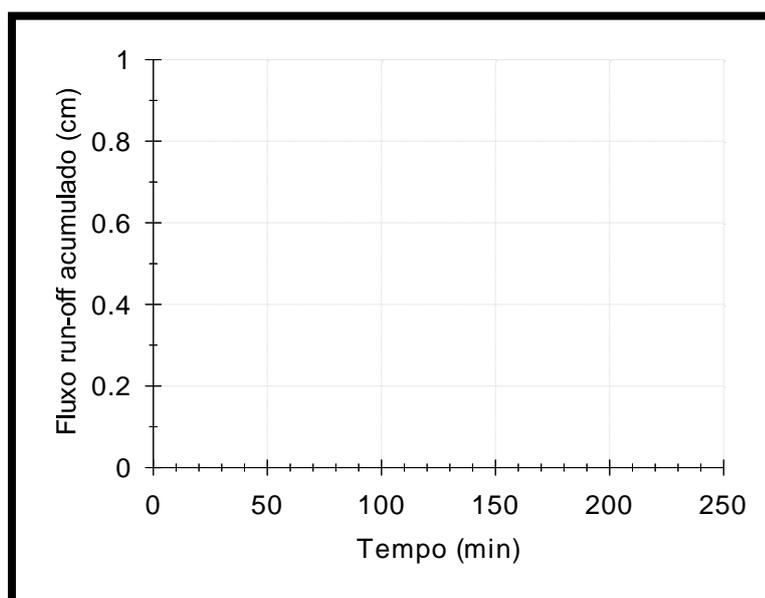


Figura 189 - Unidade 8 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

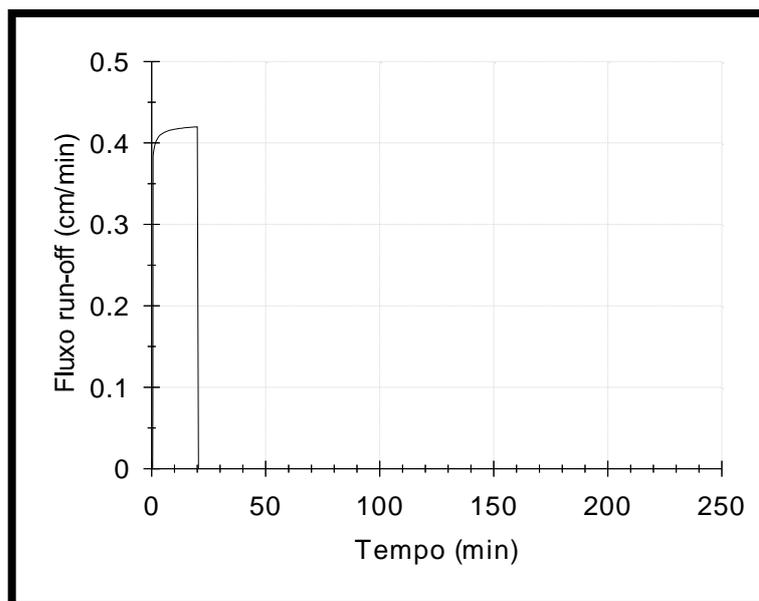


Figura 190 - Unidade 9 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

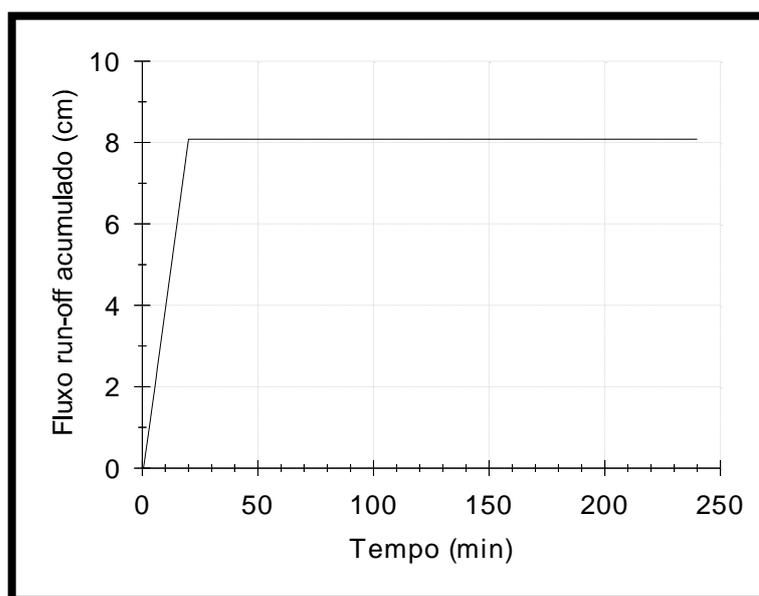


Figura 191 - Unidade 9 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

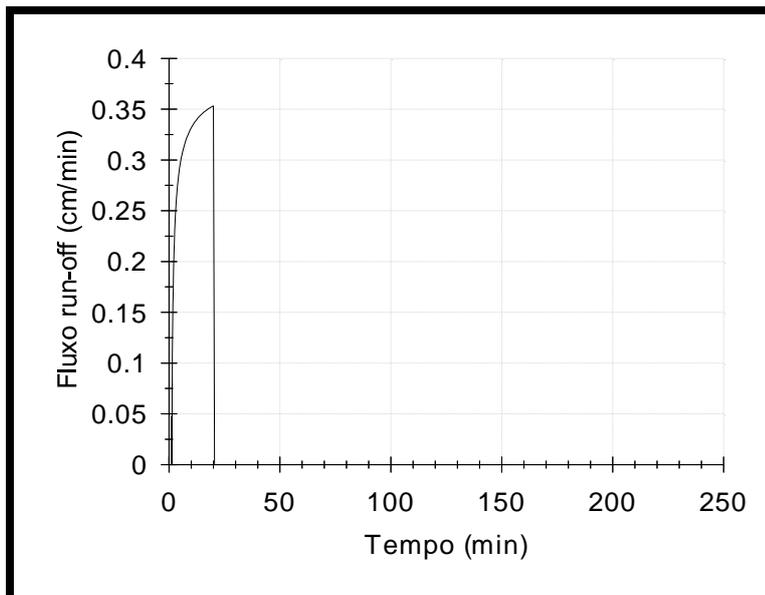


Figura 192 - Unidade 10 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

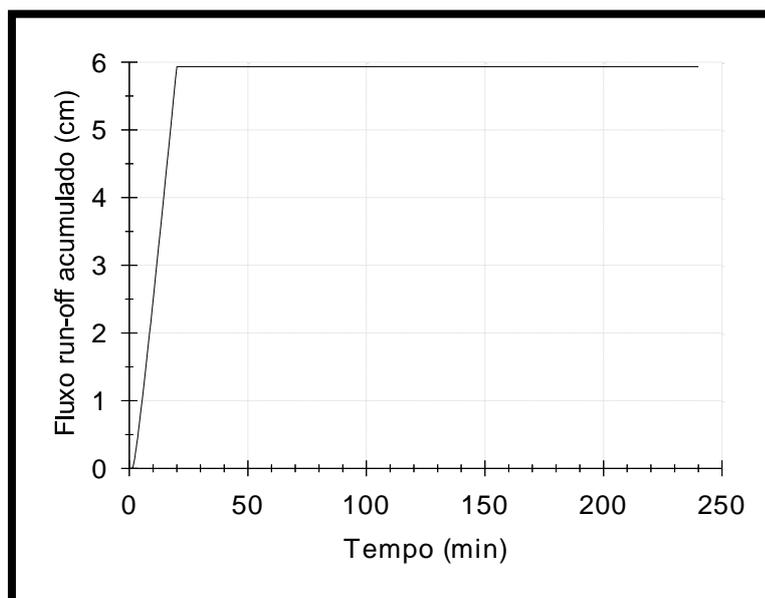


Figura 193 - Unidade 10 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

**APÊNDICE VIII – Gráficos de fluxo *run-off* (cm/min) x tempo (min) e fluxo *run-off* acumulado (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 13-14 de outubro de 1995.**

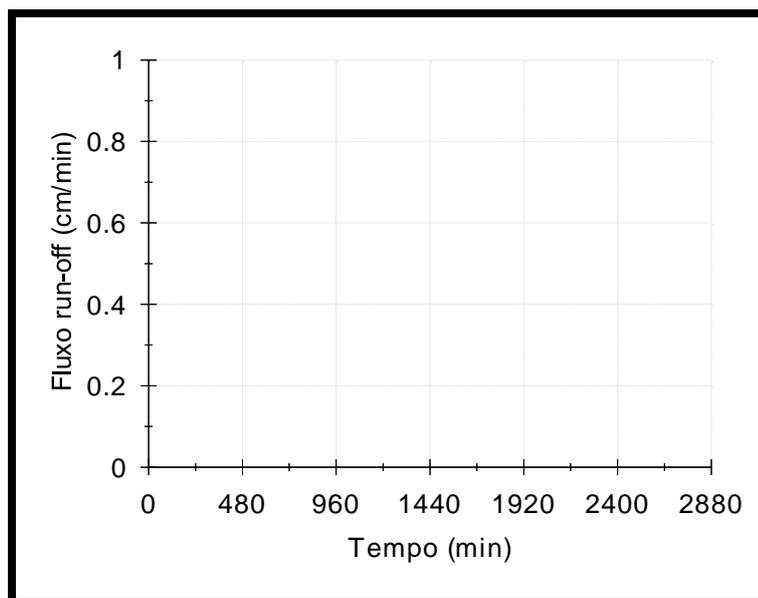


Figura 194 - Unidade 1 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

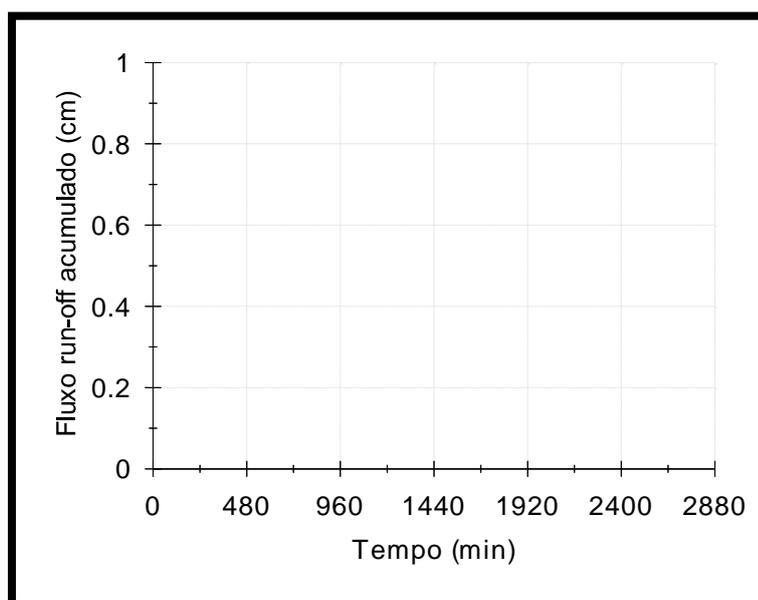


Figura 195 - Unidade 1 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

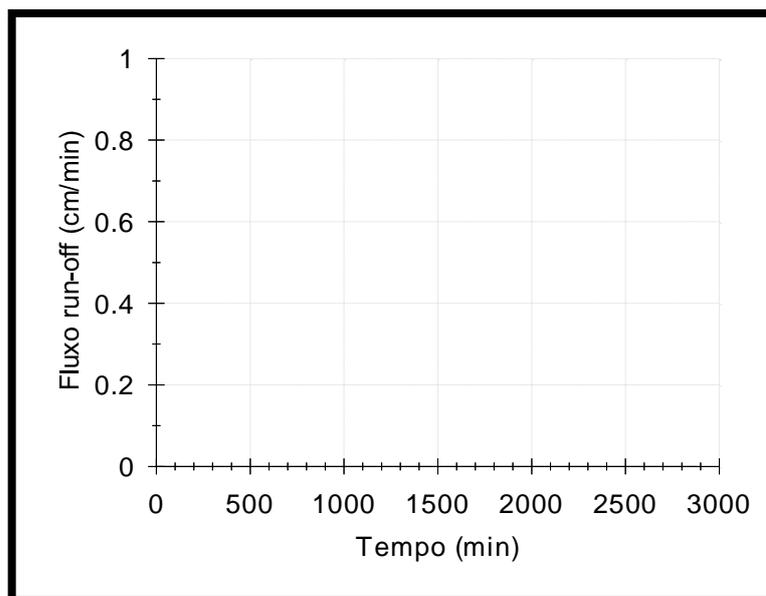


Figura 196 - Unidade 2 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

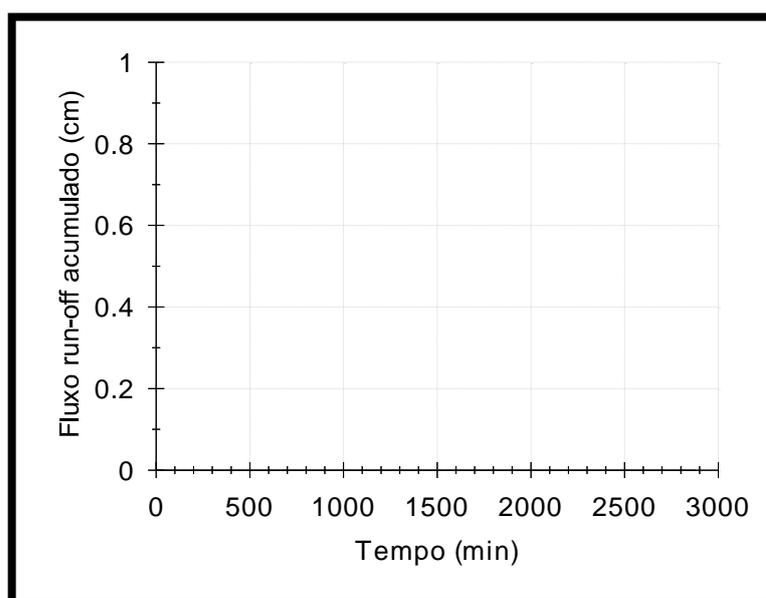


Figura 197 - Unidade 2 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

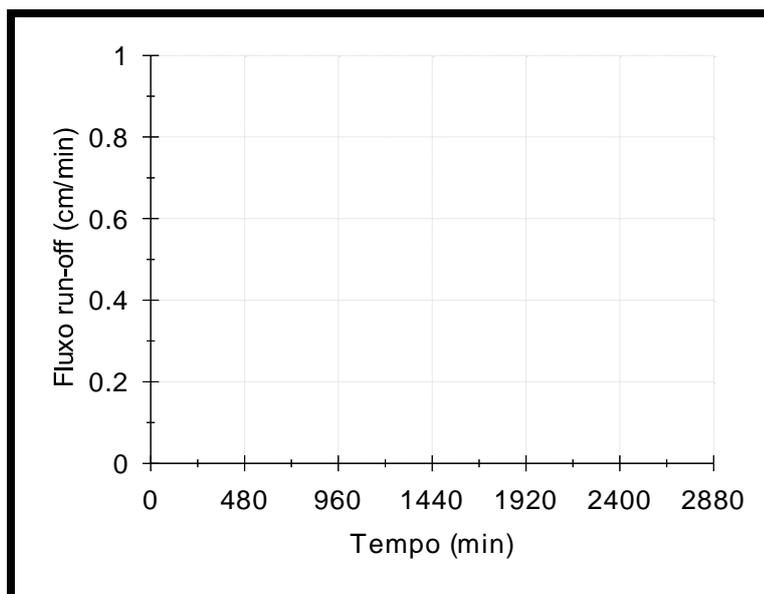


Figura 198 - Unidade 3 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

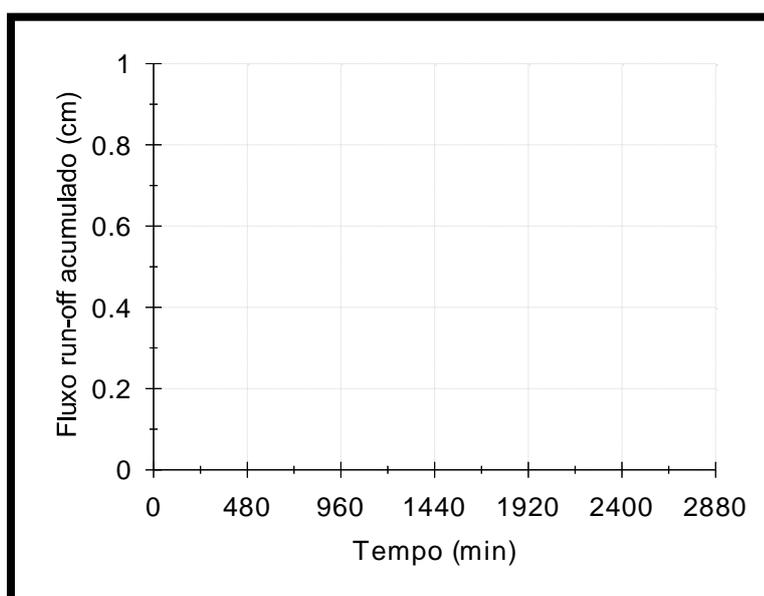


Figura 199 - Unidade 3 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

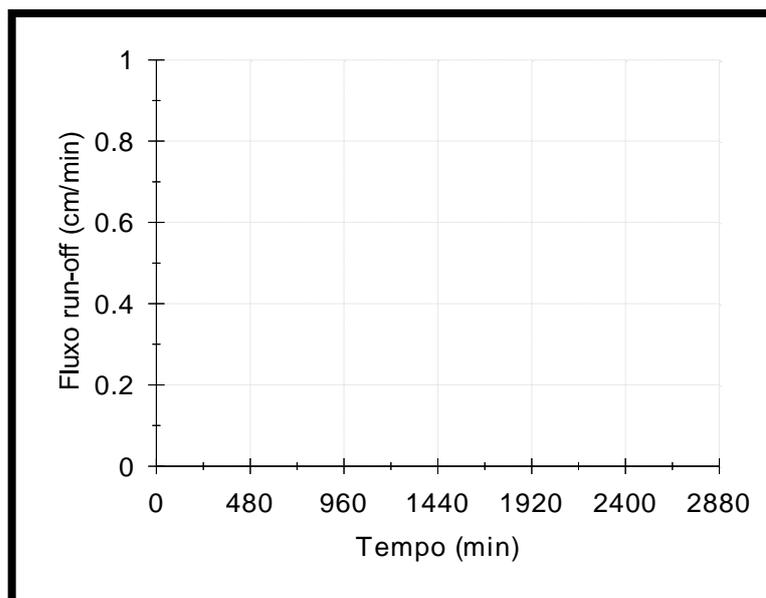


Figura 200 - Unidade 4 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

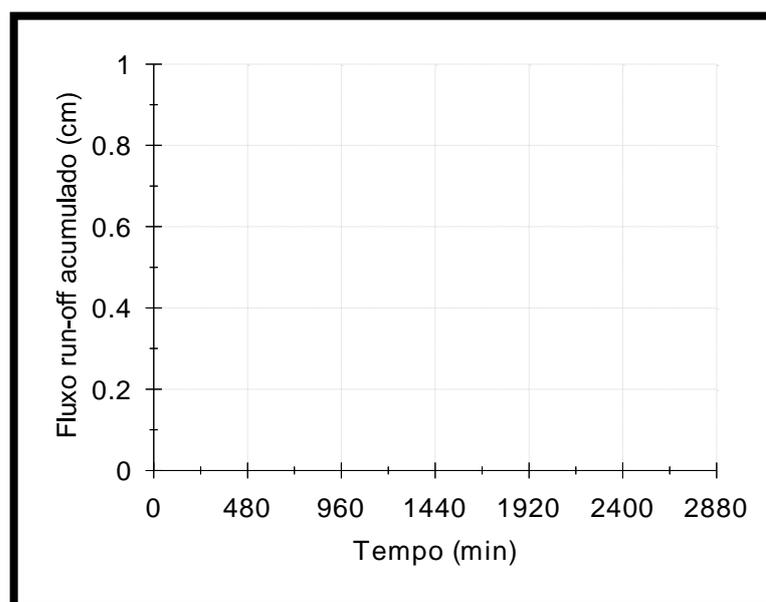


Figura 201 - Unidade 4 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

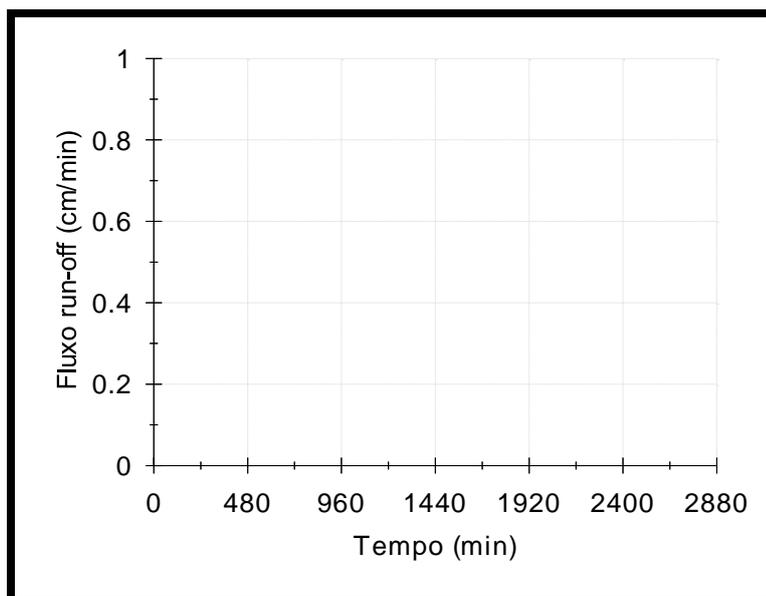


Figura 202 - Unidade 5a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

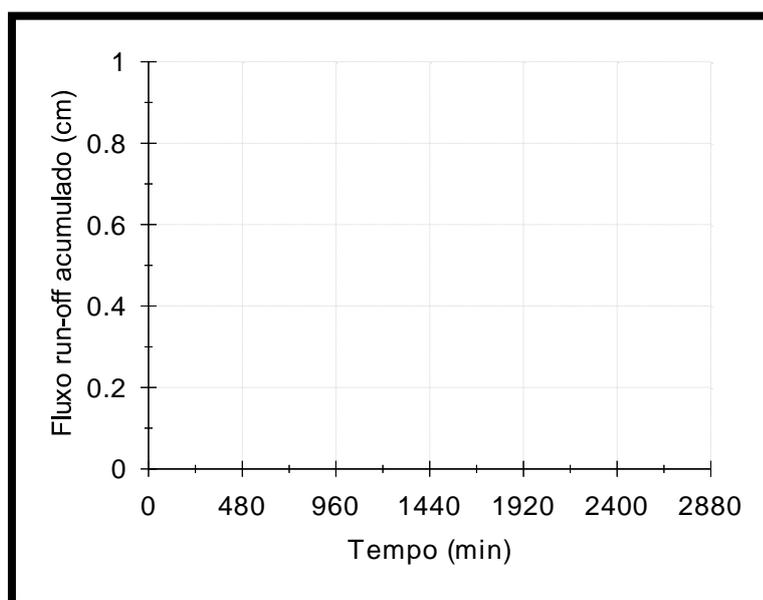


Figura 203 - Unidade 5a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

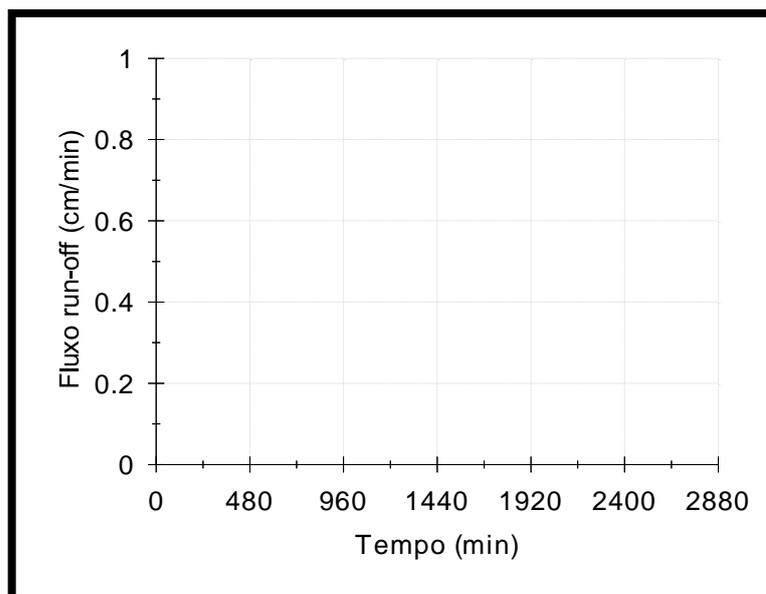


Figura 204 - Unidade 6 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

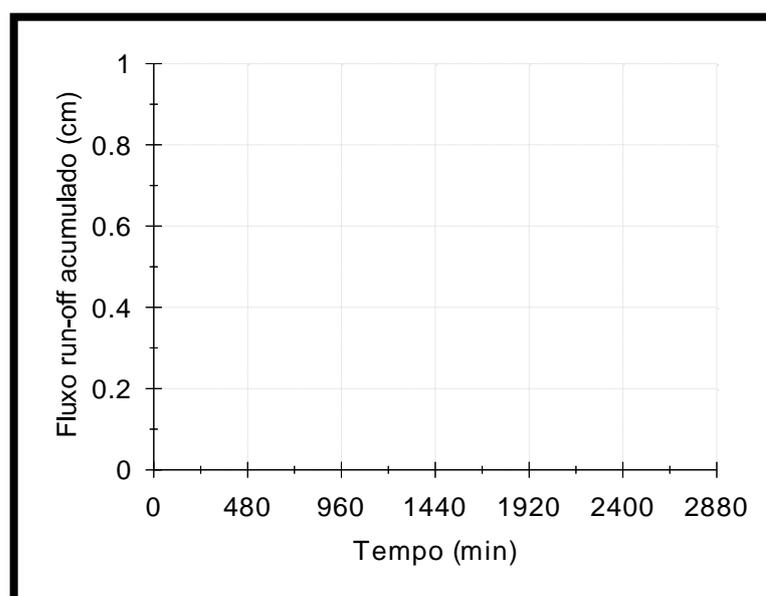


Figura 205 - Unidade 6 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

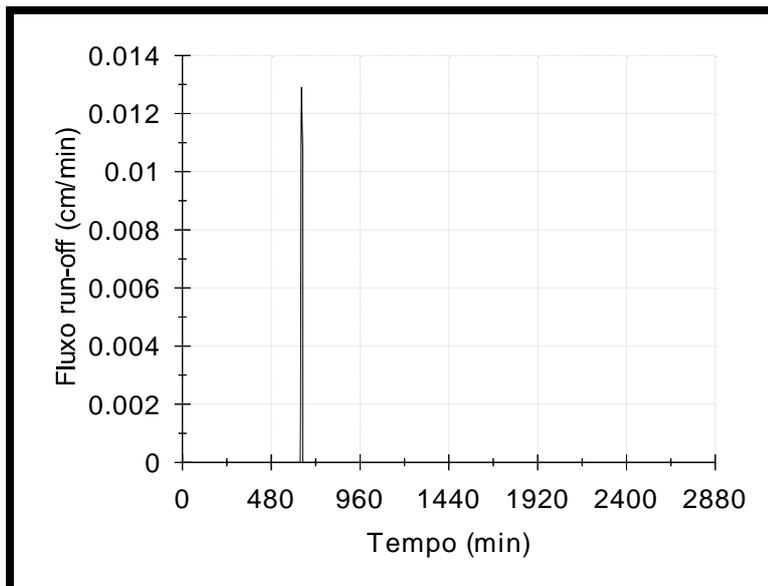


Figura 206 - Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

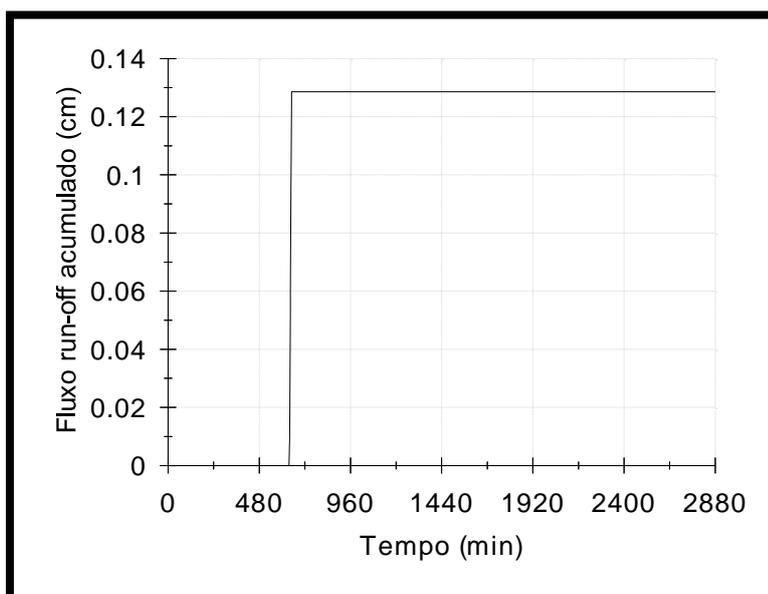


Figura 207 - Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

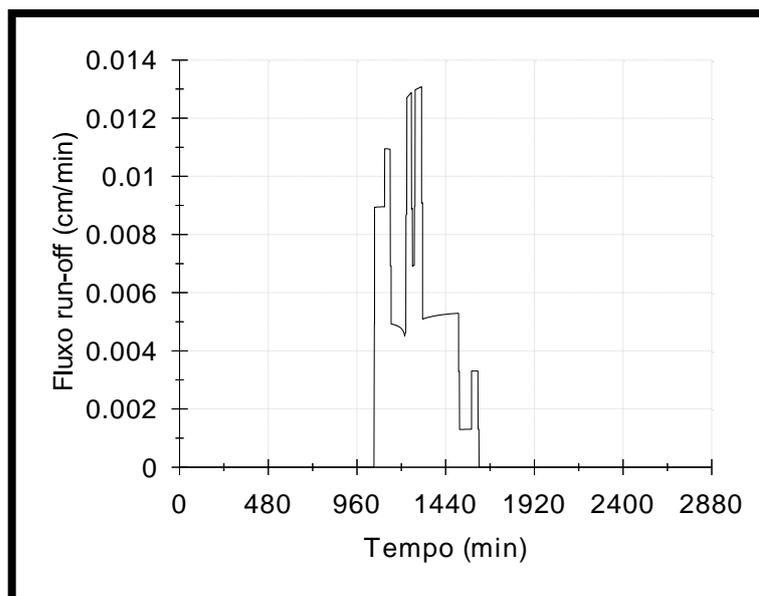


Figura 208 - Unidade 7 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

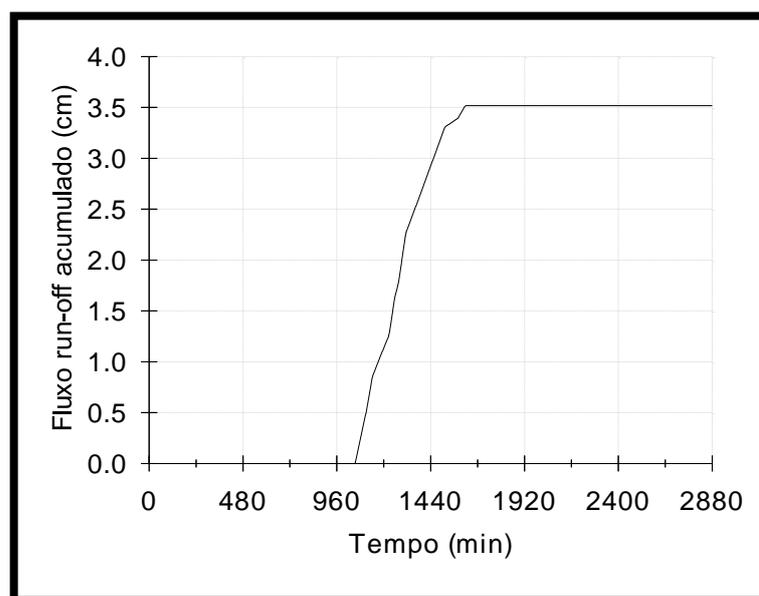


Figura 209 - Unidade 7 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

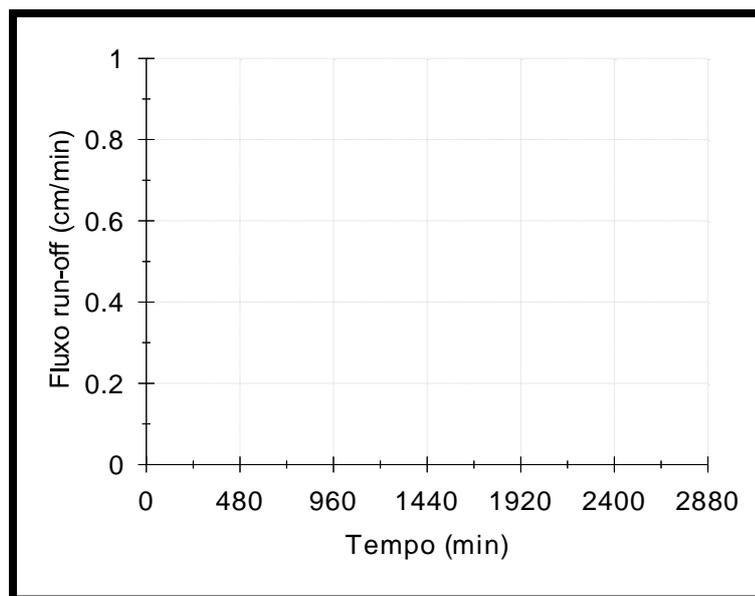


Figura 210 - Unidade 8 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

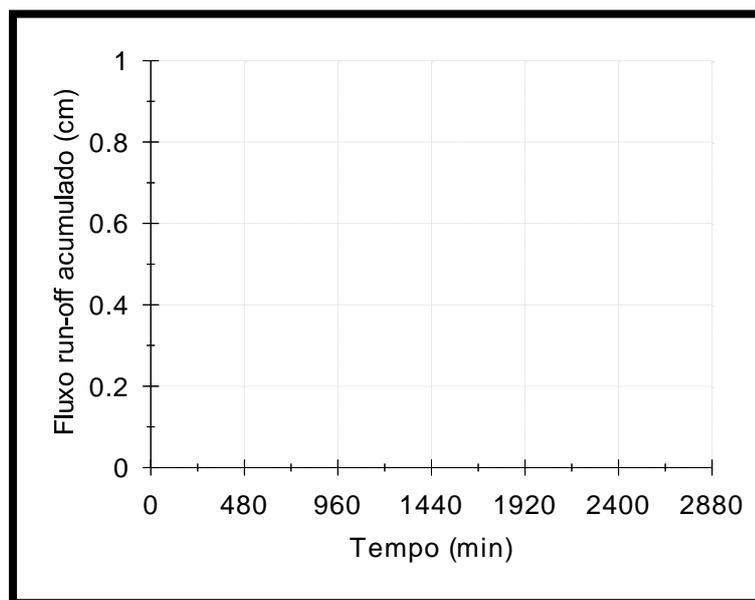


Figura 211 - Unidade 8 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

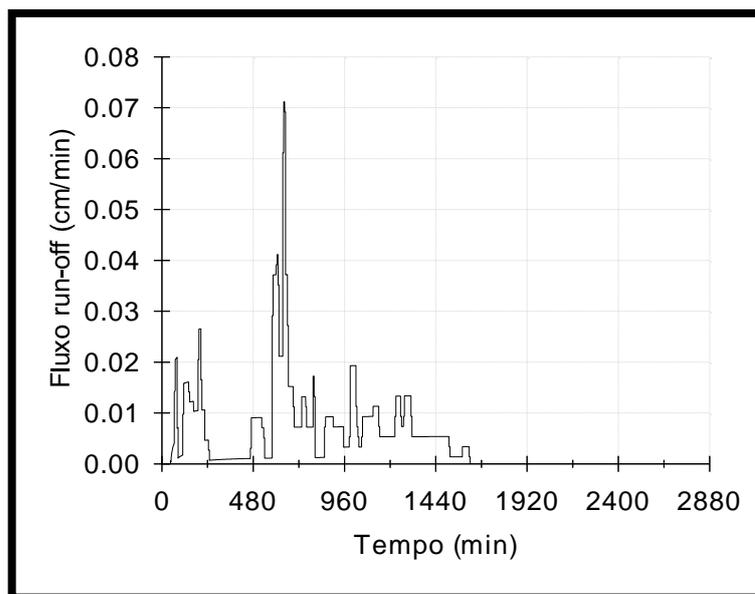


Figura 212 - Unidade 9 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

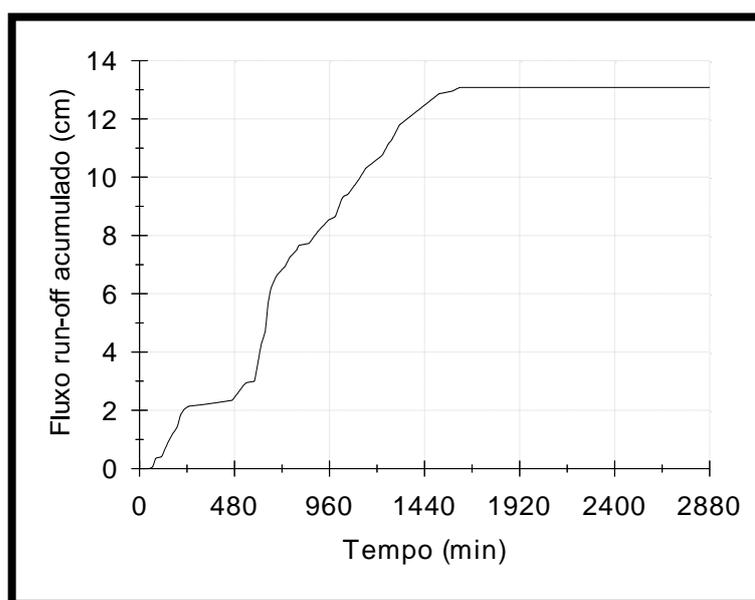


Figura 213 - Unidade 9 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

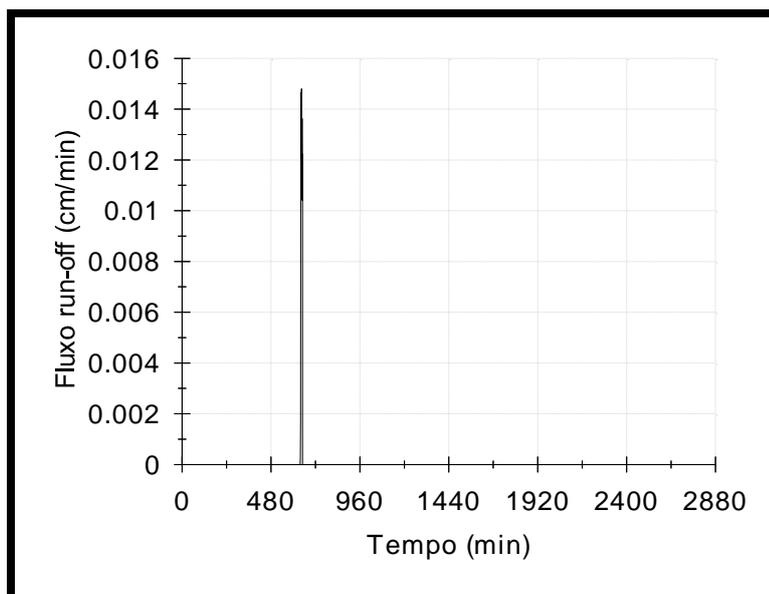


Figura 214 - Unidade 10 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

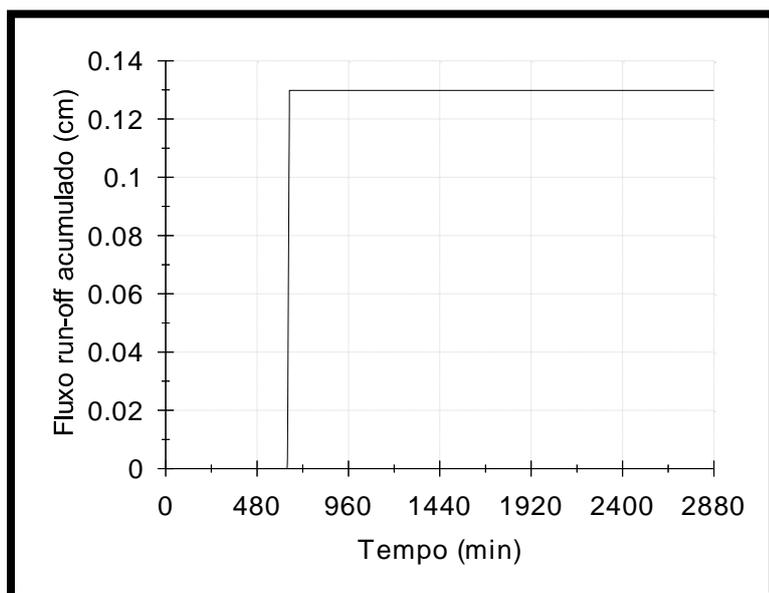


Figura 215 - Unidade 10 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

**APÊNDICE IX – Gráficos de armazenamento de água no solo (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 5 de fevereiro de 2001.**

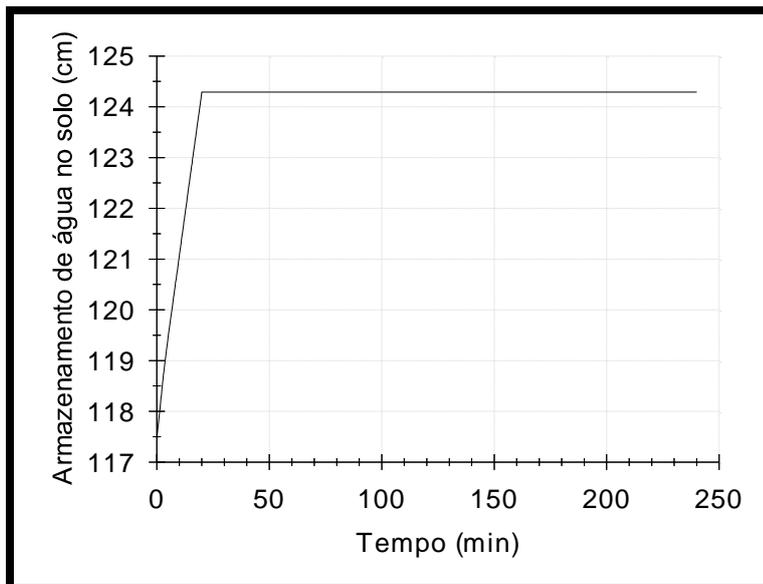


Figura 216 - Unidade 1 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

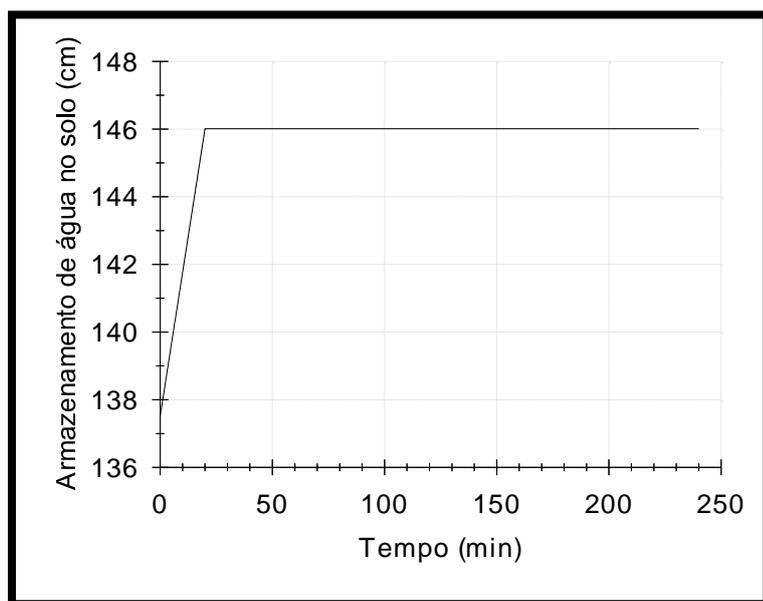


Figura 217 - Unidade 2 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

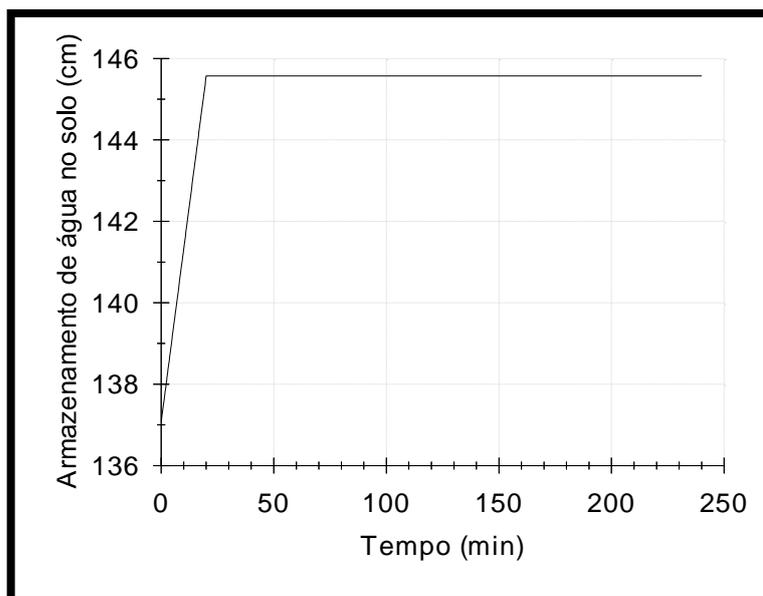


Figura 218 - Unidade 3 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

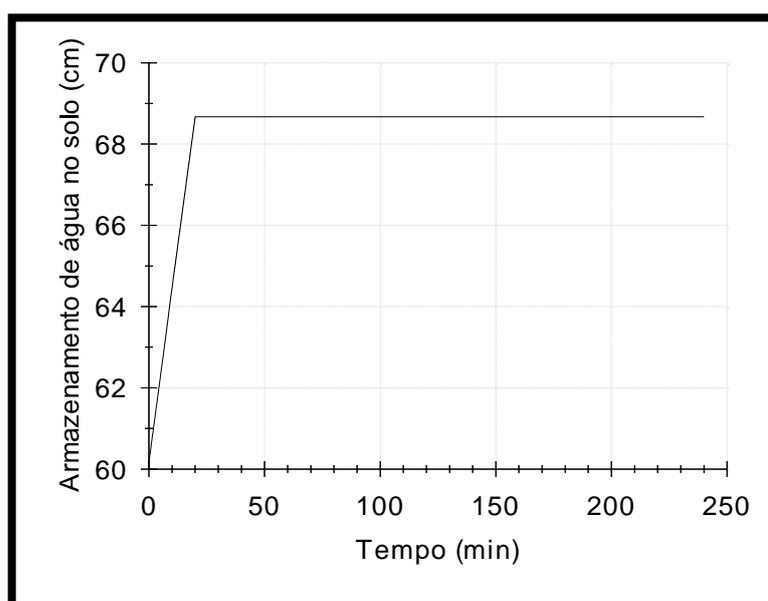


Figura 219 - Unidade 4 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

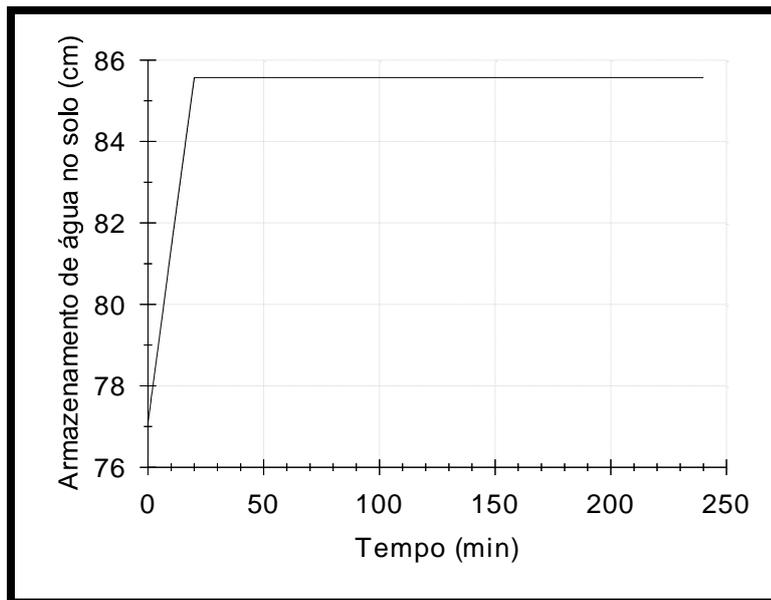


Figura 220 - Unidade 5a - evento de 5 de fevereiro de 2001.

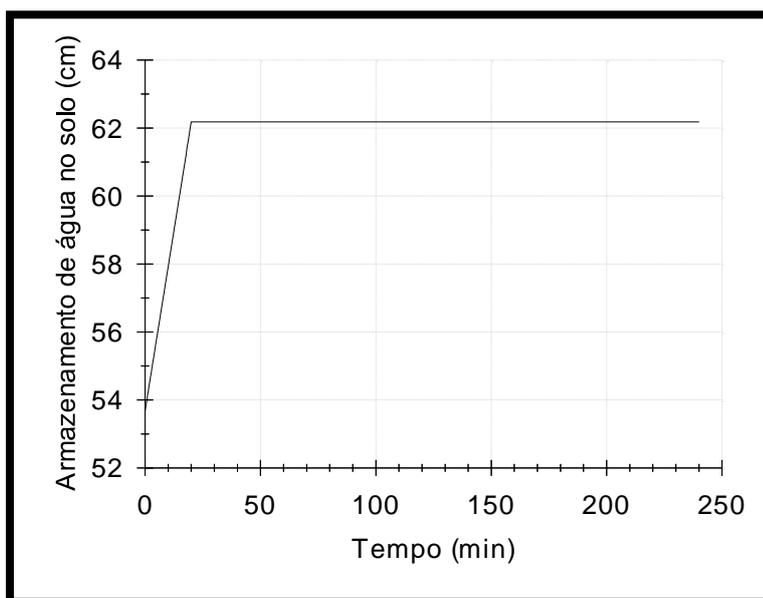


Figura 221 - Unidade 6 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

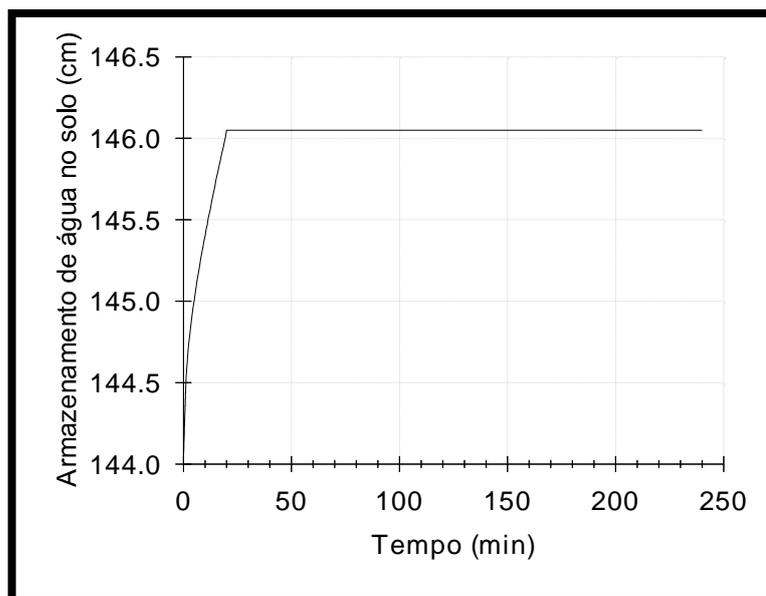


Figura 222 - Unidade 6a - evento de 5 de fevereiro de 2001.

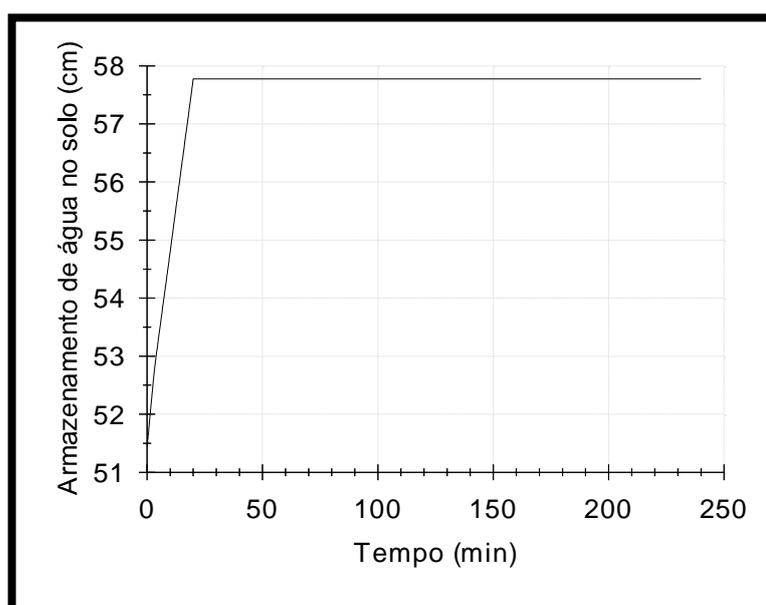


Figura 223 - Unidade 7 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

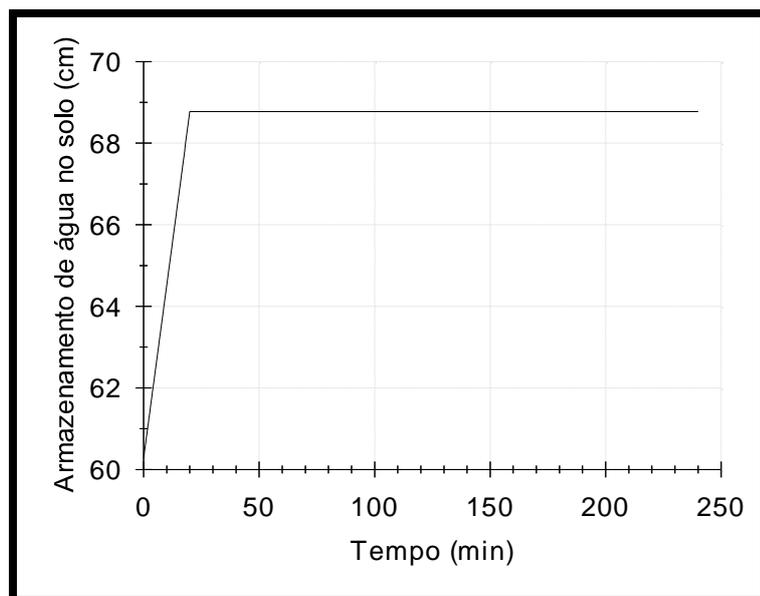


Figura 224 - Unidade 8 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

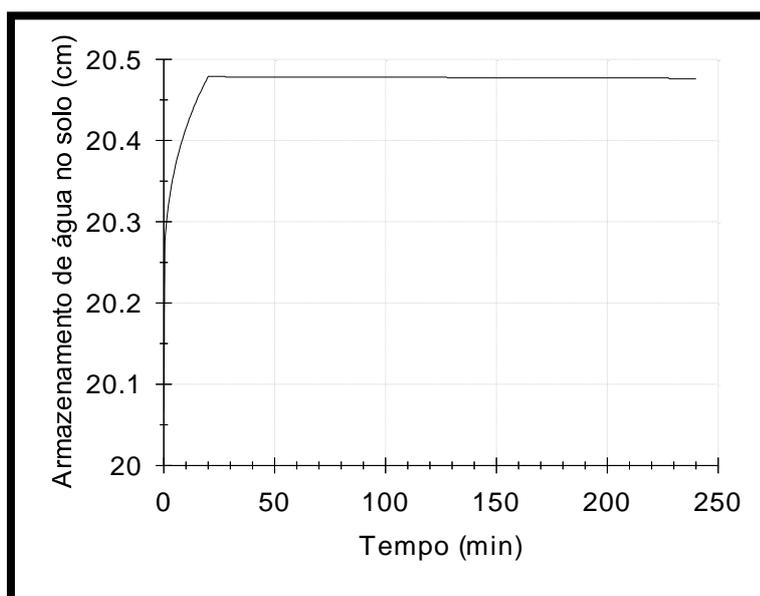


Figura 225 - Unidade 9 - evento de 5 de fevereiro de 2001.

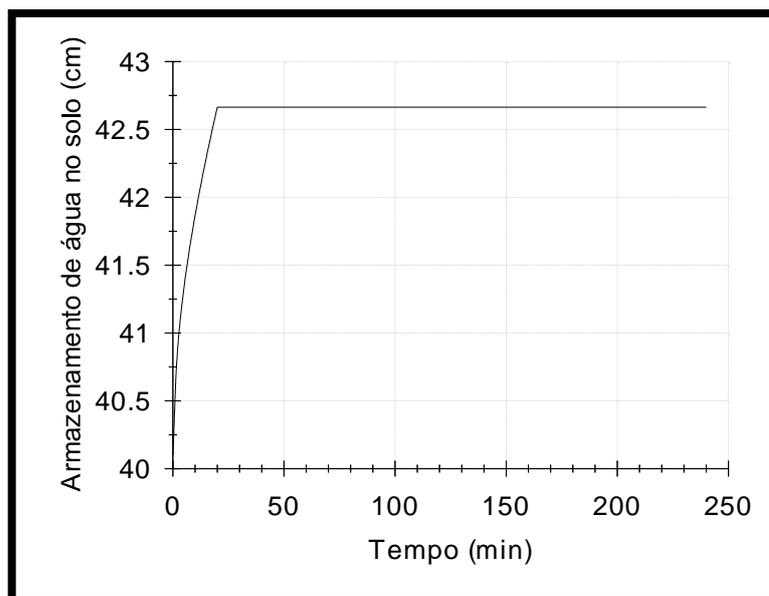


Figura 226 - Unidade 10 - evento de 5 de fevereiro de 2001.



**APÊNDICE X – Gráficos de armazenamento de água no solo (cm) x tempo (min) gerados pelo HYDRUS 1D. Evento pluviométrico de 13-14 de outubro de 1995.**

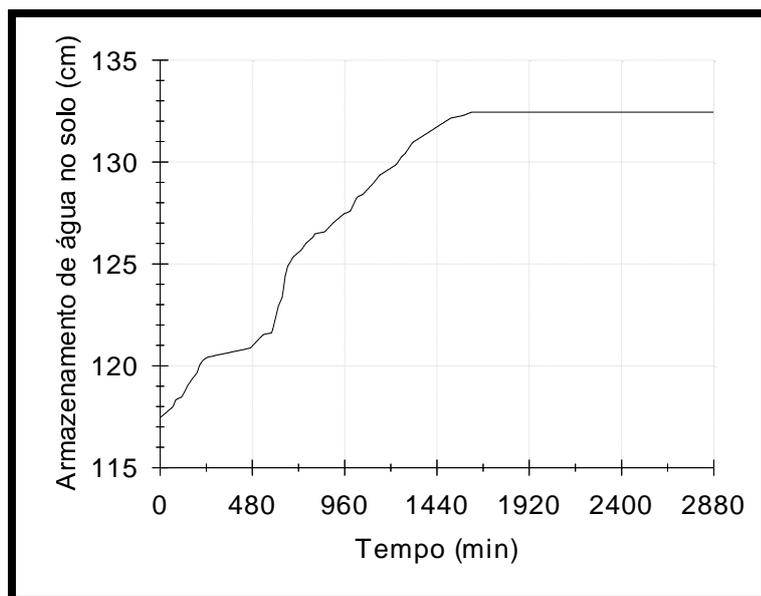


Figura 227 - Unidade 1 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

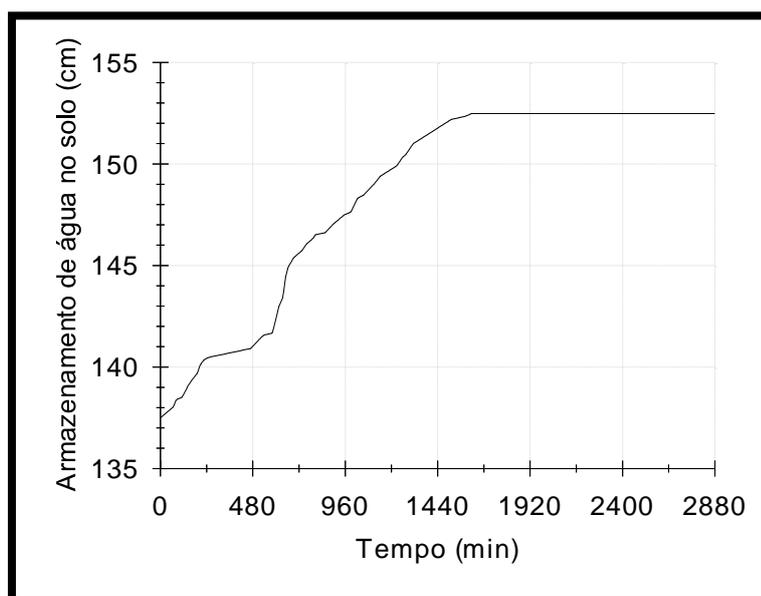


Figura 228 - Unidade 2 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

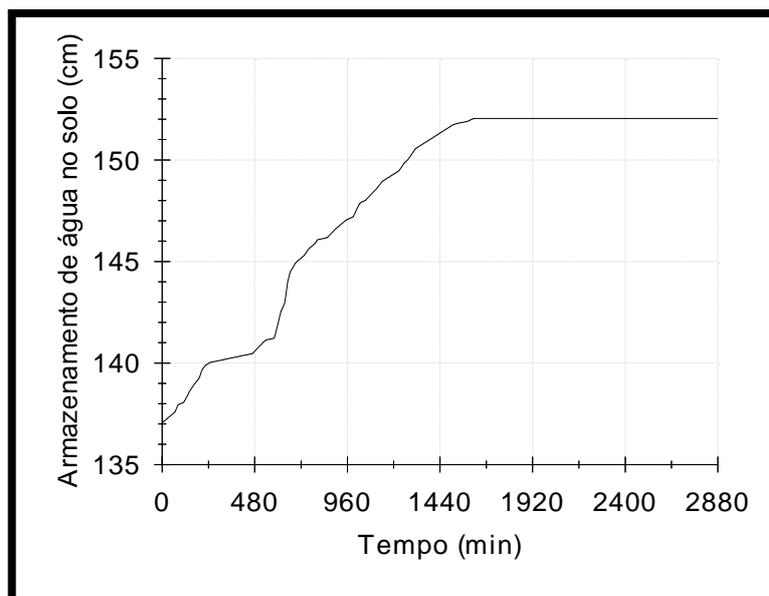


Figura 229 - Unidade 3 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

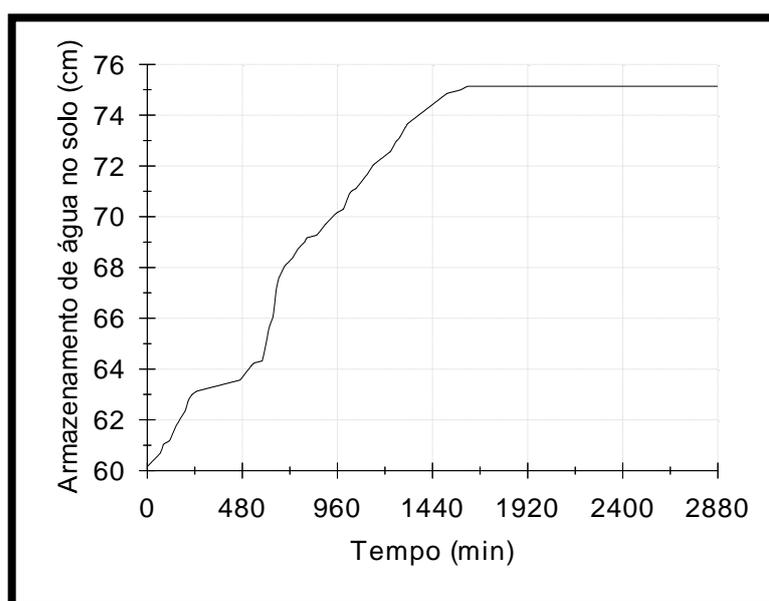


Figura 230 - Unidade 4 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

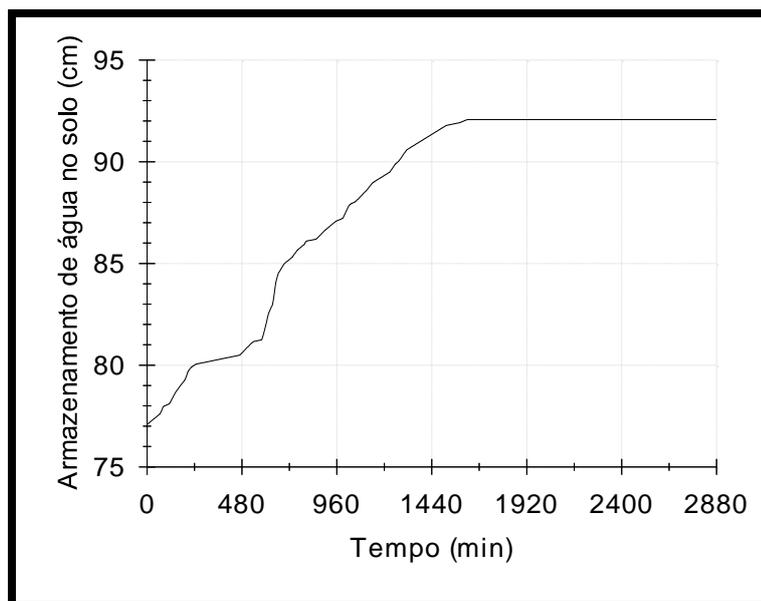


Figura 231 - Unidade 5a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

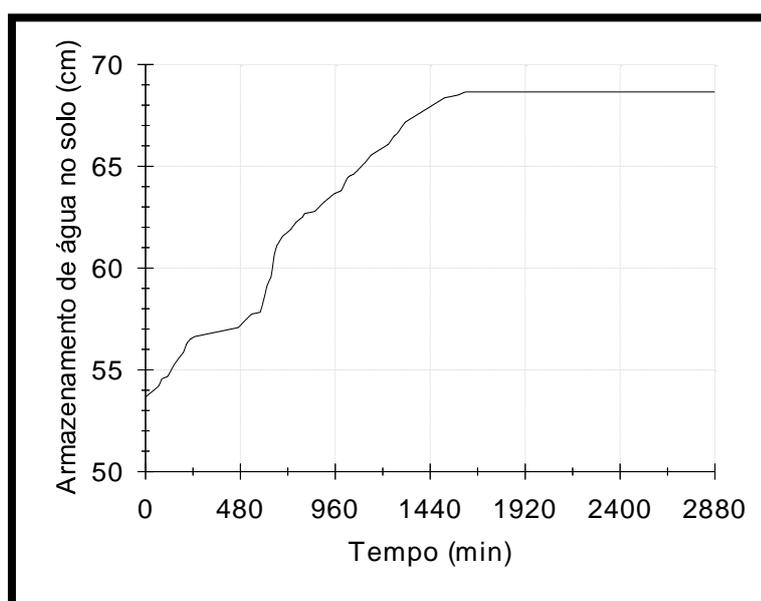


Figura 232 - Unidade 6 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

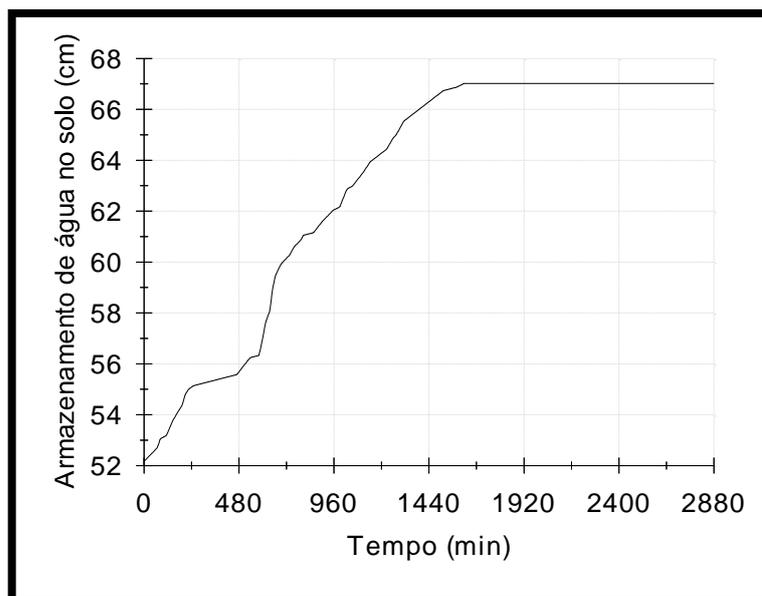


Figura 233 - Unidade 6a - evento de 13-14 de outubro de 1995.

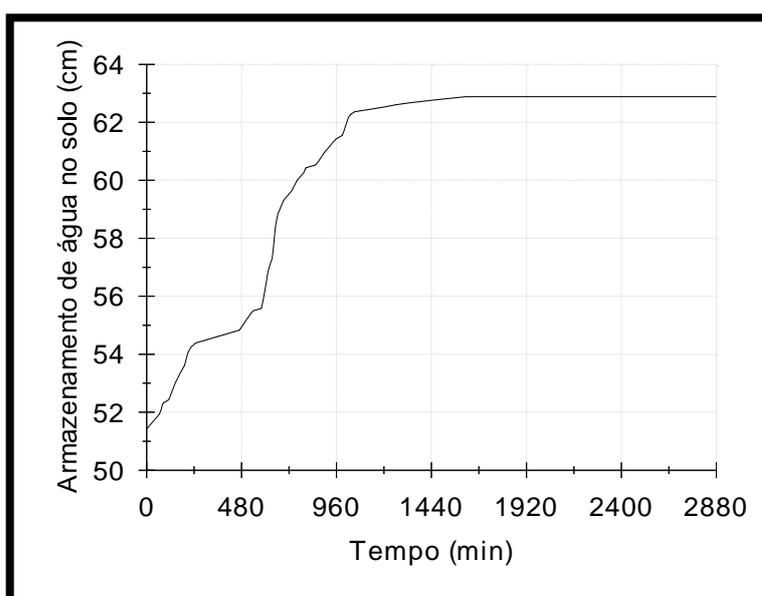


Figura 234 - Unidade 7 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

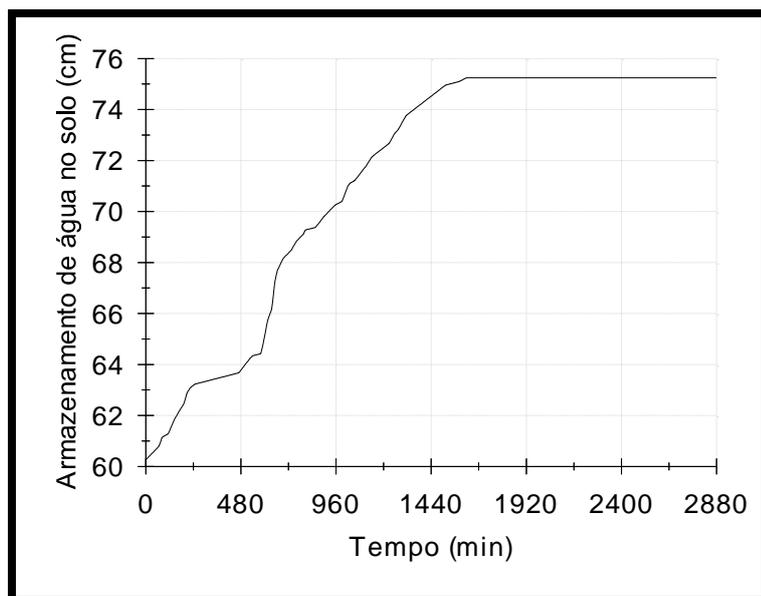


Figura 235 - Unidade 8 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

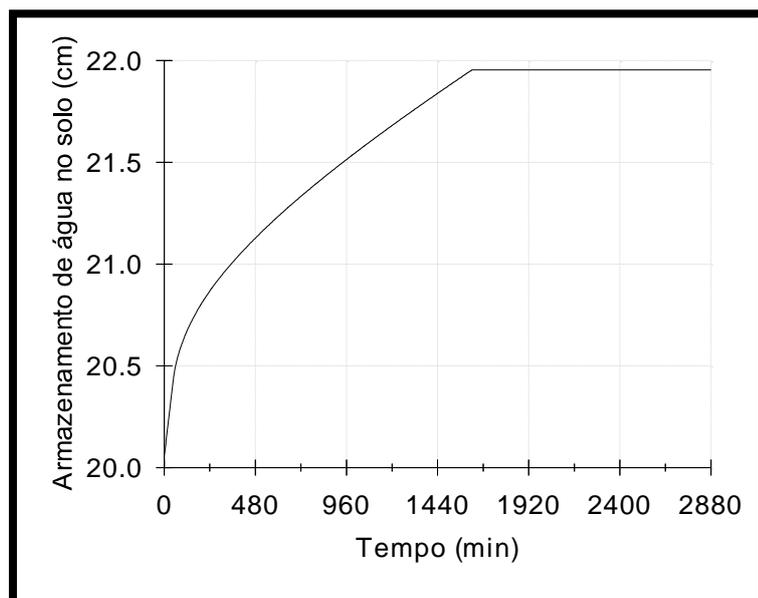


Figura 236 - Unidade 9 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

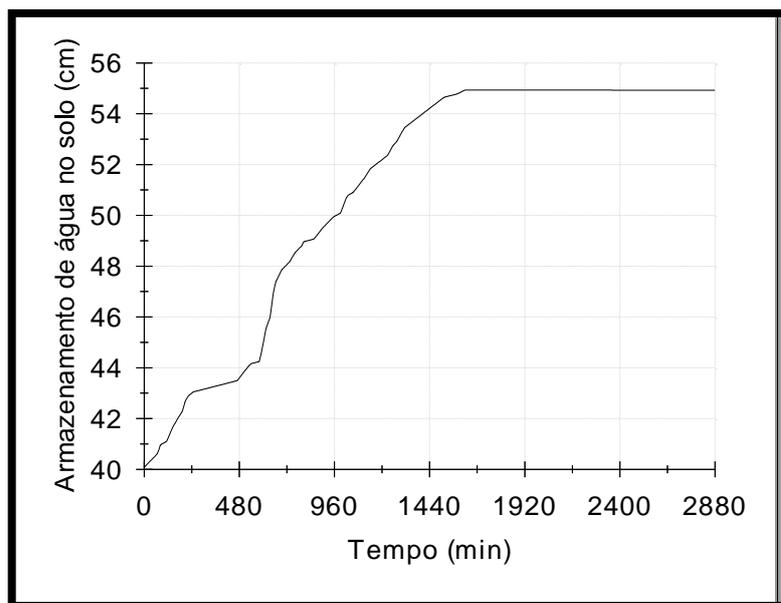


Figura 237 - Unidade 10 - evento de 13-14 de outubro de 1995.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)